

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
FAKULTA STROJNÍ



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**



**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**

Studijní program N2301 – Strojírenství inženýrství

Strojírenská technologie  
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů

**Aplikace dutých skleněných kuliček do vybraných typů  
polypropylenu**

**Application of hollow glass spheres into selected types of  
polypropylene**

Bc. Ondřej Kůrka

Vedoucí diplomové práce: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Konzultant diplomové práce: Ing. Zdeněk Severa, Ph.D.

Ing. Jiří Habr

**Rozsah práce a příloh:**

<b>Počet stran</b>	114
<b>Počet tabulek</b>	93
<b>Počet grafů</b>	20
<b>Počet obrázků</b>	40
<b>Počet příloh</b>	0

**Datum:** 24. 5. 2013



## **zadání**

**A N O T A C E**  
**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**Fakulta strojní**

**Katedra strojírenské technologie**  
**Oddělení tváření kovů a plastů**

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství

Student: Bc. Ondřej Kůrka

Téma práce: Aplikace dutých skleněných kuliček do vybraných typů polypropylenu.

Application of hollow glass spheres into selected types of polypropylene.

Vedoucí DP: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld - *TU v Liberci*

Konzultant DP: Ing. Zdeněk Severa, Ph.D. - *Magna Exteriors & Interiors (Bohemia) s.r.o.*

Ing. Jiří Habr - *TU v Liberci*

**Abstrakt:**

Práce poskytne přehled o použití dutých skleněných kuliček jako plniva v termoplastických polymerech. Na základě vyhodnocení vybraných vlastností v závislosti na procentuálním objemu a typu dutých skleněných kuliček bude jedna směs doporučena pro výrobu. Tato diplomová práce byla vypracována v rámci řešení projektu SGS 28005.

**Abstract:**

The thesis will provide an overview of the use of hollow glass spheres as fillers in thermoplastic polymers. One of the blends will be recommended for production according to the assessment of selected properties in relation to the percentage of volume and type of hollow glass spheres. This diploma thesis was developed within project SGS 28005.

### **Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 24. 5. 2013

.....

Bc. Ondřej Kůrka

Na Okruhu 17/978

46001 Liberec 1

## **Poděkování:**

V úvodu bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce prof. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi a konzultantům Ing. Zdeňku Severovi, Ph.D. a Ing. Jiřímu Habrovi za jejich odborné vedení, rady a věcné připomínky, díky kterým jsem se mohl lépe orientovat v celé problematice při vypracování předkládané diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Lubošovi Běhálkovi za pomoc při laboratorním měření, své rodině a přítelkyni za podporu, kterou mi po celou dobu poskytovali.



## **Obsah**

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
1. Úvod	11
2. Teoretická část	12
2.1. Obecně o vstřikování	12
2.2. Polypropylen	14
2.3. Plniva	15
2.3.1. Funkce a vliv plniva	16
2.3.2. Rozdělení plniv	17
2.3.3. Ostatní druhy plniv	22
2.4. Duté skleněné kuličky	24
2.4.1. Výroba	25
2.4.2. Výhody	25
2.5. Shrnutí vlivů některých plniv na vlastnosti výrobku	32
2.6. Aplikace	33
3. Praktická část	37
3.1 Příprava zkušebních vzorků	37
3.1.2. Granulace	37
3.1.3. Výroba zkušebních těles	43
3.2 Výzkum vlastností polymeru s dutými skleněnými kuličkami	47
3.2.1. Použitá zkušební zařízení a pomůcky	48
3.2.2. Stanovení hustoty imerzní metodou	49
3.2.3. Stanovení tahových vlastností	55
3.2.4. Stanovení ohybových vlastností	69
3.2.5. Stanovení rázové a vrubové houževnatosti	78
3.2.6. DSC analýza	96
4. Diskuse výsledků	98
4.1. Zhodnocení mikrostruktury	98
4.2. Stanovení hustoty	100
4.3. Stanovení tahových vlastností	100
4.3.1. Napětí na mezi pevnosti	100
4.3.2. Poměrné prodloužení	101
4.3.3. Modul pružnosti	101
4.4. Stanovení ohybových vlastností	102



4.4.1. Napětí na mezi pevnosti	102
4.4.2. Deformace v ohybu	102
4.4.3. Modul pružnosti	103
4.5. Stanovení houževnatosti	103
4.6. DSC analýza	104
5. Závěr	105
6. Seznam použité literatury	111





## **Seznam použitých symbolů a zkratk**

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
$a_{cA}$	Vrubová houževnatost
$a_{cU}$	Rázová houževnatost
$b$	Šířka zkušebního tělesa bez vrubu
$b_a$	Šířka zkušebního tělesa s vrubem
BMC	Thick Moulding Compound
C	Úplné přeražení
$C_{matrice}$	Cena matrice za 1 m <sup>3</sup> v poměru k ceně 1 m <sup>3</sup> čistého PP
$C_{plniva}$	Cena plniva za 1 m <sup>3</sup> v poměru k ceně 1 m <sup>3</sup> čistého PP
D	Průměr
DSC	Diferenciální skenovací kalorimetrie
$E_c$	Energie potřebná k přeražení zkušebního tělesa
$E_f$	Modul pružnosti v ohybu
$E_m$	Modul pružnosti v tahu
H	Kloubové přeražení
$h$	Tloušťka zkušebního tělesa
L	Délka
M	Cena za 1 kg
$m_{vz}$	Hmotnost zkušebního vzorku na vzduchu
$m_{vz,ik}$	Nekorigovaná hmotnost zkušebního vzorku v imerzní kapalině
$n$	Číslo měření
N	Nepřeraženo
PA 6	Polyamid 6
PA 66	Polyamid 66
PBT	Polybutylentereftalát
PC	Polykarbonát
PE	Polyetylen
POM	Polyoxymetylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyren

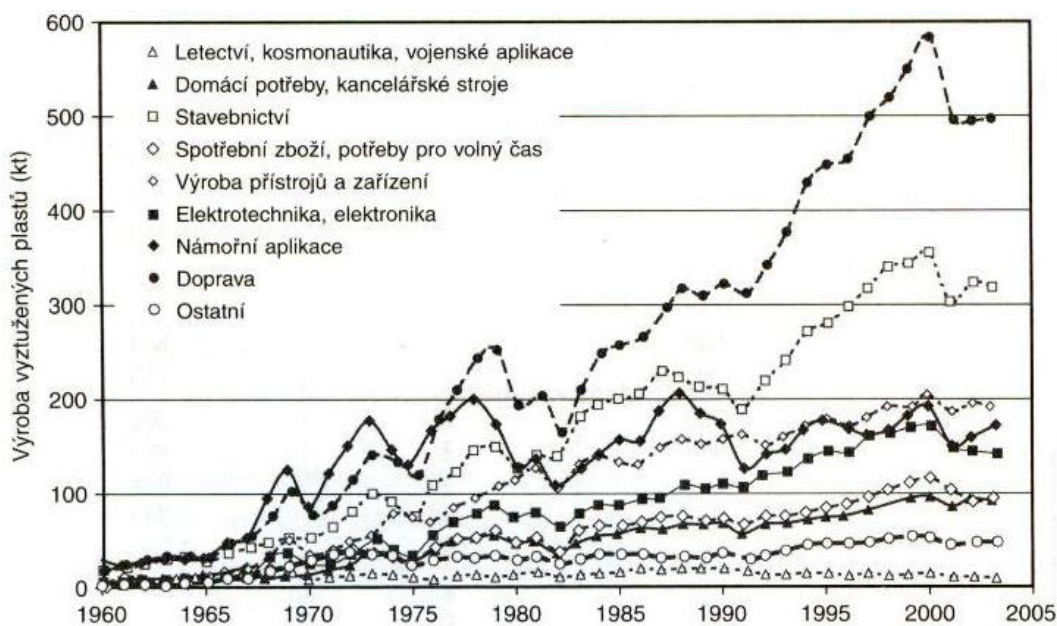


PVC	Polyvinylchlorid
PVDF	Polyvinylidenfluorid
S	Směrodatná odchylka
SMC	Sheet Moulding Compound
$T_c$	Teplota krystalizace
$T_m$	Teplota tání
VOL% GB	Poměr zastoupení plniva v objemu kompozitu
VOL% <sub>matrice</sub>	Poměr zastoupení matrice v objemu kompozitu
wt% GB	Zastoupení dutých skleněných kuliček v hmotnosti
x	Cena za 1 kg polypropylenu
$\Delta H_c$	Entalpie krystalizace
$\Delta H_m$	Entalpie tání
$\epsilon_m$	Poměrné prodloužení v tahu
$\rho_{GB}$	Hustota dutých skleněných kuliček
$\rho_{matrice}$	Hustota matrice
$\sigma_m$	Mez pevnosti v tahu
$\rho$	Hustota
$\bar{x}$	Aritmetický průměr
$\epsilon_f$	Deformace v ohybu
$\epsilon_{f1}$	Ohybová deformace 0,05 %
$\epsilon_{f2}$	Ohybová deformace 0,25 %
$\rho_{ik}$	Hustota imerzní kapaliny
$\sigma_{f1}$	Napětí naměřené při hodnotě poměrného prodloužení 0,05 %
$\sigma_{f2}$	Napětí naměřené při hodnotě poměrného prodloužení 0,25 %

## 1. Úvod

Materiály z plastů se využívají již po několik staletí. A už tehdy se objevily snahy o zlepšení vlastností původního materiálu přidáním plniv (např. v roce 1909 vyztužování kaučuku sazemi). [1]

S rostoucí výrobou vyztužených plastů (viz. obr. 1.1) byly kladeny požadavky i na stále lepší vlastnosti jejich plniv, a to při co nejnižších nákladech. Plniva se proto neustále vyvíjejí a jedním z jejich nejnovějších druhů jsou duté skleněné kuličky, kterými se tato diplomová práce bude zabývat. Tohoto plniva se využívá nejčastěji v automobilovém průmyslu pro díly vyrobené technologií vstřikování.

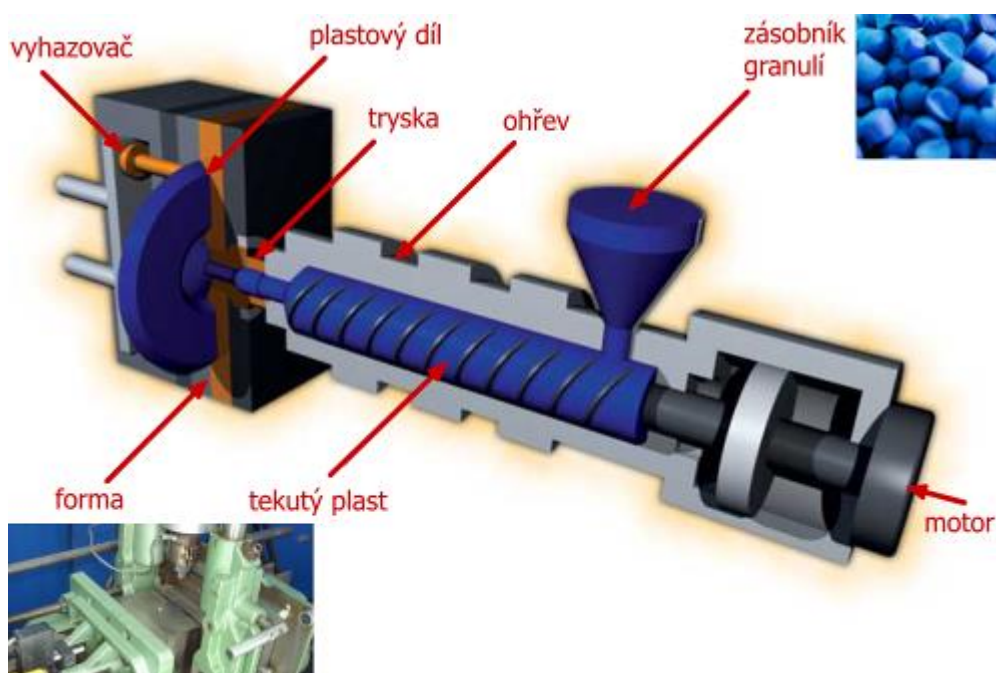


Obr. 1.1: Vývoj výroby vyztužených plastů v USA v letech 1960-2005. [2]

## 2. Teoretická část

### 2.1. Obecně o vstřikování

Technologie vstřikování je způsob tváření, při kterém je na vstřikovacím stroji (viz. obr. 2.1.1) dávka roztaveného plastu velkou rychlostí vstříknuta z pomocné tlakové komory do tvarové dutiny kovové formy, v níž ztuhne ve finální výrobek. Jedná se o diskontinuální a cyklický proces. Tímto způsobem se velmi často vyrábějí díly složitých tvarů, u kterých požadujeme vysokou rozměrovou přesnost. Jednou z hlavních výhod této technologie je také vysoká reprodukovatelnost mechanických a fyzických vlastností finálních výrobků. Z důvodu cenové nákladnosti stroje a nástroje se uplatňuje spíše pro velkosériové a hromadné výroby. [3,4]

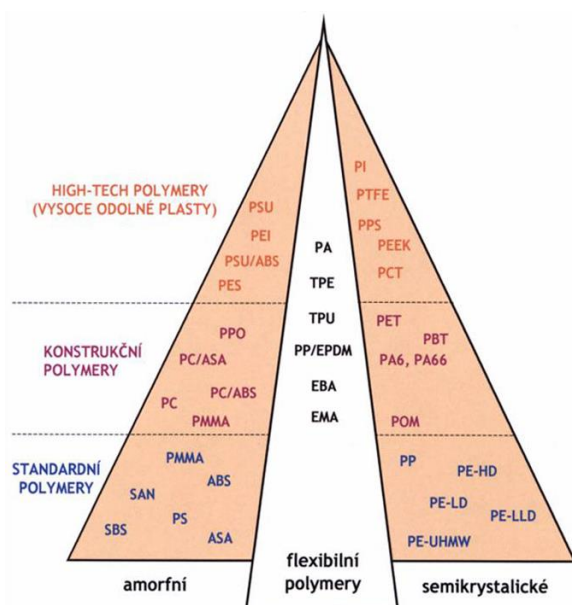


Obr. 2.1.1: Schéma vstřikovacího stroje [5]

Výsledné vlastnosti a kvalita výstřiku závisí na několika faktorech, jako jsou technologické parametry (teplota taveniny, teplota formy, rychlost naplnění dutiny formy a velikost a doba trvání dotlaku), konstrukce formy,

volba stroje a v neposlední řadě druh plastu. Všechny tyto faktory ovšem nepůsobí jednotlivě, ale ovlivňují se navzájem. [4]

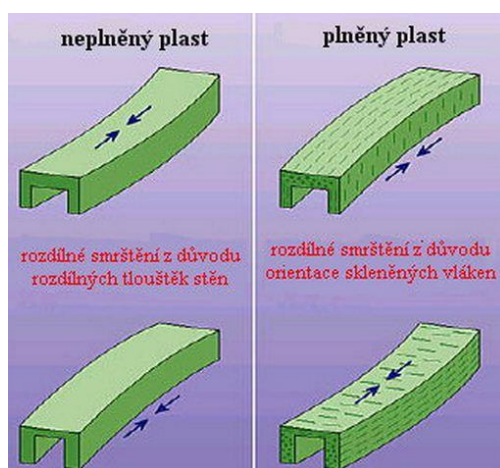
**Materiál** ovlivňuje mechanické a fyzikální vlastnosti výstřiku nejvíce. Během výroby pochopitelně není ekonomicky výhodné, abychom na základě požadovaných vlastností výrobku měnili nástroj a stroj a také změny technologických parametrů mají své hranice. Proto je nutné v první řadě zvolit správný druh plastu. Rozdělení polymerů je na obrázku 2.1.2.



Obr. 2.1.2: Rozdělení polymerů podle jejich aplikace a nemolekulární struktury [4]

Vlastnosti výstřiku z hlediska **volby polymeru** jsou ovlivněny:

- Rychlostí plastikace – chceme jí co nejkratší, ale nesmí dojít k degradaci plastu.
- Reologickými vlastnostmi – požadujeme dostatečnou tekutost, která by se zároveň neměla příliš měnit s klesající teplotou.
- Tepelnou stabilitou – plast by měl být dostatečně tepelně stabilní ve svém rozsahu zpracovatelských teplot, který by měl být nejlépe co nejširší.
- Vnitřním pnutím – jeho velikost chceme co nejnižší.
- Uvolňováním těkavých látek – mělo by být minimální.
- Smrštěním – požadujeme rozměry výsledného výstřiku co nejblíže k rozměrům tvarové dutiny formy. Rozdílné smrštění je na obr. 2.1.3. [3,4]



Obr. 2.1.3: Rozdílné smrštění jako důsledek různých tloušťek stěn a orientace skleněných vláken [4]

Náklady na zpracování plniv pro kompozitní materiály, jako jsou PS, PVC nebo PE, v porovnání se zpracovatelskými náklady u nevyztužených materiálů jsou poměrně vysoké, proto se s plnivem většinou nepoužívají a vyztužují se naopak dražší materiály jako např. POM, PC, PA 6, PA 66, PBT atd., u kterých se rozšiřuje možnost jejich použití. Výjimku z levnějších materiálů tvoří polypropylen (PP). [2]

## 2.2. Polypropylen

Protože praktická část práce se bude věnovat kompozitu dutých skleněných kuliček a polypropylenů, bude zde popsána základní charakteristika tohoto materiálu.

Polypropylen je jedním z nejvíce využívaných polymerů pro technologii vstřikování, a to je hlavně z důvodu příznivého poměru cena/mechanické vlastnosti polypropylenů. Po polyetyleně je to druhý nejvýznamnější polyolefin. Tento termoplast se využívá v mnoha odvětvích, například v potravinářském, textilním a zejména v automobilovém průmyslu. Obvykle se používá v izotaktické formě. Polypropylen je významný konstrukční plast z toho důvodu, protože má dobré mechanické vlastnosti, jako je pevnost,



tuhost, nízká, molekulová hmotnost, dobré tepelné vlastnosti, odolnost vůči korozi a výhodou je také přizpůsobivost různým aplikacím. Navíc je poměrně levný a jeho vlastnosti se dají modifikovat širokým spektrem přísad plnivy. [6,7,8]

Právě díky kompozitům polypropylenu, tedy matrice s dalšími přísadami, můžeme ovlivňovat a měnit jeho vlastnosti, možnosti použití, snižovat cenu nebo zvyšovat užité vlastnosti. Jedním z nejvíce využívaných plniv v polypropylenu (hlavně v automobilovém průmyslu) je talek. [8]

## 2.3. Plniva

Plasty můžeme rozdělit podle několika hledisek. Podle jejich aplikace, jejich teplotního chování, nadmolekulární struktury, polarit, chemické struktury a v neposlední řadě podle druhu přísad. [4]

Podle druhu přísad dělíme plasty na neplněné a plněné. Někdy se plněné plasty mohou označovat také jako kompozitní materiály. Základní uspořádání kompozitního materiálu je pojivo (čímž je polymer s aditivu) a plnivo. Pojivo určuje základní mechanické a fyzikální vlastnosti hmoty, je zpravidla houževnatější, přenáší zatížení na plnivo a chrání ho před okolní atmosférou. Plnivo tyto mechanické a základní vlastnosti výrazně ovlivňuje. [9]

Přísadou plastů mohou být kromě vyztužujících plniv také maziva (pro snížení tření), barviva (pro dodání požadovaného odstínu plastu), stabilizátory (pro zpomalení degradačních procesů, zvětšení odolnosti proti zvýšené teplotě nebo proti povětrnostním vlivům), změkčovadla (pro zlepšení houževnatosti a ohebnosti), nadouvadla (pro lehčené hmoty), tvrdidla (způsobují vytvrzení – např. u vytvrditelných pryskyřic), retardéry hoření, atd. Obsah plniva je určen předpokládaným způsobem zpracování plastu. Pro technologii vstřikování se maximální hranice obsahu plniva většinou



pohybuje kolem 50 hmotnostních procent, u vytlačování může obsah plniva dosáhnout i více jak 50 procent. [3]

### 2.3.1. Funkce a vliv plniva

Plniva se přidávají do plastů již od počátků plastikářského průmyslu (například dřevěná moučka ve fenol-formaldehydové pryskyřici – začátek 20. století). Dříve se používala hlavně levná plniva jako křída nebo jíl, dnes je tendence používat plniva, která výrazně zlepšují vlastnosti polymerů (mechanické vlastnosti, stabilitu, elektrickou vodivost, nehořlavost atd..). [9]

Plniv využíváme v okamžiku, kdy chceme zlepšit mechanické vlastnosti plastů (např. tuhost, pevnost), popřípadě chemickou odolnost, elektrické vlastnosti, tvarovou stálost a rozměrovou stabilitu při zvýšené teplotě, snížit koeficient tření, navlhavost, či hořlavost. Jiná plniva můžeme používat jen za účelem zlevnit výsledný materiál, takzvaně ho naplnit (zvětšit objem plastu) nebo snížit, případně zvýšit jeho hmotnost.

Potenciál plniva je určen:

- Chemickou strukturou,
- fyzikálními aspekty (velikost, geometrie, velikost povrchu, povrchová energie),
- hmotností. [4,10]

Jako pomůcka pro porovnání mezi vyztuženými a nevyztuženými plasty může sloužit poměr ceny a některé z materiálových vlastností, jako je např. mez pevnosti v tahu (viz. vzorec 2.3.1.1), tlaku nebo ohybu.

$$\text{Pro mez pevnosti v tahu: } \frac{\rho \cdot M}{\sigma_m} \text{ nebo: } \frac{\rho \cdot M}{E_m} \quad (2.3.1.1)$$

Kde je

$\rho$  - hustota (g/cm<sup>3</sup>),

$M$  - cena za 1 kg,





$\sigma_m$  - mez pevnosti v tahu (N/mm<sup>2</sup>),

$E_m$  – modul pružnosti v tahu (N/mm<sup>2</sup>).

Z tohoto porovnání vyplývá, že při posuzování modulu pružnosti, jsou obecně nevyztužené plasty dražší než vyztužené. O to více, pokud jsou výrobky namáhány tahovým nebo tlakovým (jednoosým) námáháním.

Při posuzování pevnosti v tahu jsou výhodnější spíše dražší vyztužené konstrukční plasty. [2]

### 2.3.2. Rozdělení plniv

Podle chemického původu dělíme plniva na:

- Organická,
- anorganická.

Podle struktury na:

- Amorfní (např. sklo),
- krystalická (např. kalcit). [3]

Podle účelu dělíme plniva na:

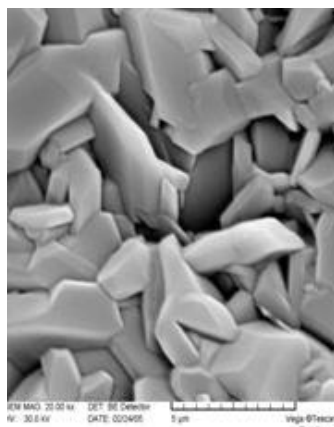
- a) **Vyztužující** – přidávají se do materiálu z důvodu zlepšení mechanických vlastností, případně chemické odolnosti nebo tvarové stálosti při zvýšených teplotách. V kompozitním materiálu tak zvyšují jeho pevnost, tuhost, odolnost k tečení za studena (creep), zároveň snižují ohebnost, tažnost, kluzné vlastnosti (kromě uhlíkových vláken), smrštění (většinou ale výrazně zvyšují anizotropii smrštění). Koncentrace těchto plniv se v materiálech pohybuje od pěti do šedesáti hmotnostních procent. Obvykle mají tvar krátkých nebo dlouhých vláken. Nejčastěji se používají vlákna skleněná, uhlíková, z nerezových ocelí, minerální vlna (wollastonit, čedič) atd.



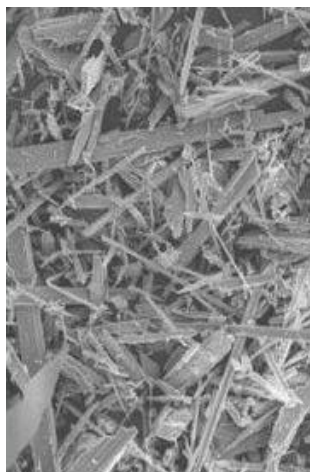
- b) **Nevyztužující** – někdy se také označují jako plniva částicová, protože se obvykle používají ve formě prášku. Patří sem řada minerálních plniv o různém tvaru a velikosti částic. Přidávají se nejčastěji z důvodu snížení ceny materiálu. Tato plniva zároveň snižují smrštění, zvyšují tepelnou odolnost, tvrdost a tuhost, ale také zvyšují viskozitu. Koncentrace plniv se ve výsledném kompozitním materiálu pohybují od nízkých obsahů (menší než 1 hmotnostní procento) až po vysoké (60 a více hmotnostních procent). [9,10]

U těchto nevyztužujících plniv se uplatňují hlavně levné materiály, jako například tato minerální plniva:

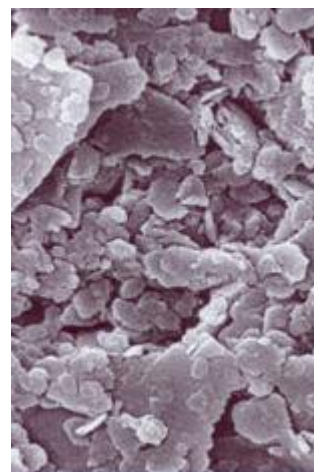
- a) **Talek (mastek)** – využití hlavně v polypropylenu, kde snižuje jeho cenu, má dobrý poměr tuhosti a rázové houževnatosti, zlepšuje rozměrovou stabilitu, snižuje napětí na mezi kluzu. Viz. obr. 2.3.2.1.
- b) **Vápenec** – používá se převážně pro snížení ceny materiálu, ale zlepšuje i některé mechanické vlastnosti. Vyskytuje se v nerostech a horninách.
- c) **Wollastonit** – zlepšuje tepelné a mechanické vlastnosti (modul pružnosti), zvyšuje životnost, odolnost proti poškrábání. Jedná se o nejměkčí minerál. Viz. obr. 2.3.2.2.
- d) **Kaolin, jíl** – zvyšují rázovou houževnatost, teplotní a chemickou odolnost, rozměrovou stabilitu. Jejich zvláštní vlastnost je, že zabraňuje slepování fólií z polyetylenu a polypropylenu. Viz. obr. 2.3.2.3.
- e) **Slída** – zvyšuje tuhost, rozměrovou stabilitu, mírně snižuje rázovou houževnatost.
- f) **Silika** – zvyšuje modul pružnosti, napětí na mezi kluzu, odolnost proti otěru a lesk. Používá se ve formě prášku.
- g) Mezi další, méně významné, můžeme zařadit **baryt** (dobře izoluje zvuk), **křemelinu** (diatomit), **pyrofylit**, **tremolit s talkem** (oba zlepšují tepelnou stabilitu). [11,12]



Obr. 2.3.2.1: Talek  
[13]



Obr. 2.3.2.2:  
Wollastonit [14]



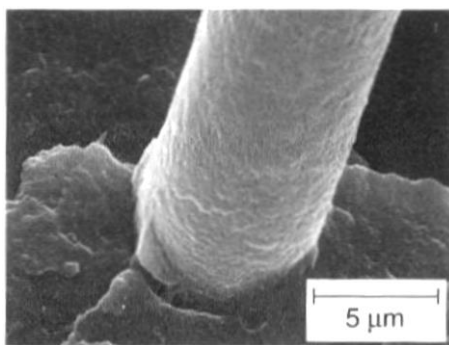
Obr. 2.3.2.3: Kaolin  
[13]

Podle velikosti a tvaru částic se plniva dělí na:

- 1) **Kulovitá** – díky kulovitému tvaru nezvyšují odpor proti toku v takové míře jako ostatní tvary a nevznikají velké koncentrace napětí. Kulovitá plniva (kuličky) můžeme dále rozdělit podle jejich materiálu na:
  - a) **Skleněná** – vyrábějí se z rozdrceného skla.
  - b) **Keramická** – vyrábějí se jako vedlejší produkt při spalování uhlí.
  - c) **Uhlíková** – výroba probíhá zahříváním vhodných organických materiálů s nadouvadly.
  - d) **Kovová** – mimo jiné zvyšují tepelnou vodivost plastu (kovy mají tepelnou vodivost několikanásobně vyšší než plasty). Výhodou dobré tepelné vodivosti je zkrácení výrobního cyklu a snížení smrštění.
- 2) **Destičková** – výrazně zvyšují viskozitu, tím je limitováno jejich množství (max. 200 dílů plniva na 100 dílů plastu). [3,10]
- 3) **Jehličková** – jeho typickým představitelem je wollastonit, který má krystaly právě jehlicovitého tvaru. Dále se využívá i talek nebo baryt. Plní se buď dlouhými jehličkami (200 µm) nebo krátkými jehličkami (20 µm). [10,12]

- 4) **Vláknitá (fibrilární)** – používá se buď **krátké** vlákno, kde délka vlákna je max. 1 mm (viz. obr. 2.3.2.4), které je statisticky rozděleno nebo **dlouhé** vlákno (viz. obr. 2.3.2.5). Toto rozdělení závisí na poměru délka/průměr vlákna, kdy dlouhá vlákna mají poměr  $L/D$  větší než 100 a krátká poměr  $L/D$  menší než 100. Kompozitní materiály s dlouhými vlákny mají oproti kompozitům s krátkými vlákny lepší mechanické vlastnosti, vyšší vrubovou houževnatost, lepší odolnost proti tečení za studena (creep), lepší stálost za vyšších teplot a nižší průtažnost. Zároveň ale zvyšují anizotropii vlastností. Záleží na orientaci vláken. Zhruba do 80% podílu vláken platí, že se zvyšujícím se obsahem rostou mechanické vlastnosti kompozitu. Největší koncentrace smykového napětí je u konců vláken, z tohoto hlediska je lepší použít dlouhá vlákna, než více krátkých vláken. [3,10]

Vláknitá plniva zpravidla neslouží ke snížení ceny, ale vylepšují vlastnosti jako pevnost, houževnatost, creep, odolnost proti rázu. Jejich princip je vyztužující, kdy vlákna mají jednou až dvakrát vyšší pevnost a tuhost ve srovnání s pojivem, a tak se při vnějším namáhání méně deformují. Za předpokladu adheze mezi vlákny a polymerem umožňují přenos veškerého napětí z pojiva do plniva, takže pojivo je prakticky bez napětí. [3,10]



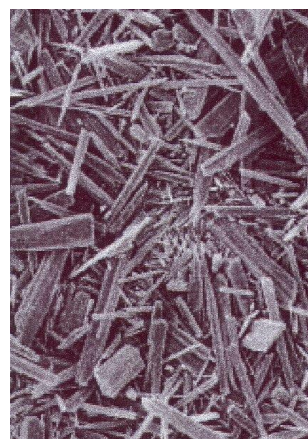
Obr. 2.3.2.4: Krátké vlákno [15]



Obr. 2.3.2.5: Dlouhé vlákno [16]

Dle materiálu vláken se dále rozdělují na vlákna:

- a) **Skleněná** – sklo je nejrozšířenějším materiálem vláken. Výroba probíhá tažením skloviny, která byla roztavena při teplotě zhruba 1400°C. Tato vlákna se mohou ještě dělit na tzv. *E-vlákna*, která jsou vyrobena z bezalkalické skloviny a jsou tak vynikajícím elektrickým izolantem, *S-vlákna*, která mají o 40 až 70 % vyšší pevnost nebo *C-vlákna*, které mají vysokou odolnost proti kyselinám a chemicky agresivním látkám. [2]
- b) **Keramická** – mají malé uplatnění, protože jsou křehká, drahá a obtížně zpracovatelná. Mají malou teplotní roztažnost, malou elektrickou vodivost, ale velkou tuhost a odolnost proti hoření.
- c) **Kovová** – (viz. obr. 2.3.2.6). Nejčastěji nerezová ocel. Ve formě dlouhých vláken se používají pro kordy pneumatik, zvyšují modul pružnosti, houževnatost i tepelnou stabilitu. Jako krátká vlákna se využívají také pro běhouny pneumatik. Mají dobrou odolnost proti opotřebení. Dále mají uplatnění pro brzdové obložení nebo elektricky vodivé plasty.
- d) **Uhlíková** – záleží na teplotě zpracování: při 1000-2000 °C dochází ke karbonizaci a vlákno má největší pevnost v tahu, při teplotě 2400-3000 °C dochází ke grafitizaci a vlákno získává vyšší modul pružnosti. Pro svou kombinaci malé hmotnosti a vysoké pevnosti se používají jako kompozitní materiály pro části letadel, automobilů, pro sportovní vybavení atd.
- e) **Přírodní** – Zejména vlákna na bázi celulózy (len, konopí, bavlna, juta, sisal). Jejich uplatnění je jako levná alternativa skleněných vláken, například pro lehké méně pevnostně náročné díly (interiéry automobilů atd.).



Obr. 2.3.2.6: Kovové částice [13]



- f) **Polypropylenová** – mají nejnižší hustotu, ve formě krátkých i dlouhých vláken. Jsou levná, ale mají slabou adhezi k polymerní matici a nízkou teplotu tání. Výroba probíhá řezáním orientovaných fólií nebo vytlačováním z taveniny.
- g) **Polyetylenová** – vykazují nízkou teplotu tání a velmi nízkou hustotu. Používají se jako tkanina pro vyztužení polyesterových pryskyřic (spolu s uhlíkovými a skelnými vlákny). Vyrábí se buď protažením, kdy se získá vysoký stupeň orientace nebo rozpuštěním v rozpouštědle a vytlačováním přes zvlákňovací trysku.
- h) **Polyvinylalkoholová** – mají mechanické vlastnosti jako nylon nebo polyester, zároveň mají výbornou adhezi k termosetům. Výroba probíhá mokřím nebo suchým zvlákňováním.
- i) **Polyamidová** – dosahují velké pevnosti v tahu, výborné houževnatosti, odolnosti proti opotřebení. Využití např. pro kordy pneumatik letadel. [10]

### 2.3.3. Ostatní druhy plniv

Kromě zmíněných druhů plniv se ještě hojně využívají i další druhy, které mají velmi specifické vlastnosti:

#### 1) Saze

Jsou to všestranná plniva, proto je nutné vybrat specifický druh, abychom dosáhli požadovaných vlastností. Ovlivňují lesk, barvu, zvyšují elektrickou vodivost (s rostoucím množstvím sazí roste vodivost), redukuje vliv UV radiace na oxidaci plastů (s klesající velikostí částic se zvyšuje schopnost absorpce UV záření, k ovlivnění dojde už při použití 2-3 hmotnostních procent). Používají se například v gumárenském průmyslu. [10]

## 2) Dřevěná moučka

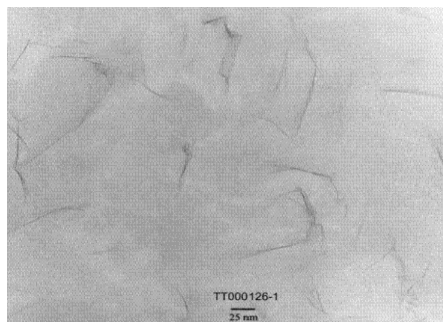
Jedná se o rozdrcené tvrdé dřevo. Snižuje cenu, oproti minerálním plnivům má malou hmotnost, ale nezlepšuje mechanické vlastnosti. Je citlivá na vlhkost. Jako plnivo má hlavně estetické vlastnosti (např. podobnost se dřevem), u polypropylenu snižuje citlivost vůči UV záření. [10]

## 3) Popílek

Popílků je mnoho druhů. Můžeme je podle původu klasifikovat jako popílek ze spalování uhlí, popílek ze spalování tuhého komunálního odpadu a popílek z rýžových slupek pšeničné slámy. Hlavní výhodou použití popílku jako plniva je jeho cena, protože se vždy jedná o odpad vzniklý z určité produkce. [10, 11]

## 4) Nanoplňiva

Jedním z druhů plniv jsou i nanoplňiva. Čili plniva, které mají částice s rozměrem alespoň v jednom směru menší jak 1  $\mu\text{m}$ . Materiály s nanoplňivy se nazývají nanokompozity (viz. obr. 2.3.3.1). Podle tvaru částic můžeme nanoplňiva dělit na:



Obr. 2.3.3.1: Nanokompozit [13]

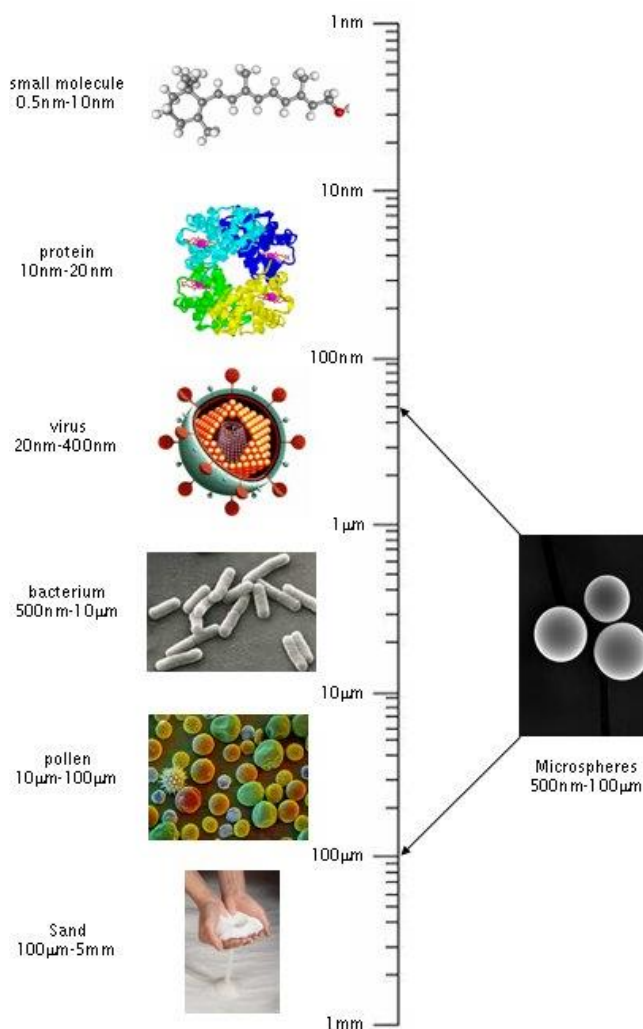
- a) **Vrstevnatá** – jedná se o minerální jíly (nejčastěji se využívá montmorillonit), které mají silikátové vrstvy rozděleny na tenké pláty (tloušťka pod 1 nm). Vyznačují se vysokou tuhostí, způsobují retardaci hoření. Vznikají interkalací, kdy se molekuly polymeru zabudovávají mezi pláty do struktury jílu.
- b) **Destičková** – rozměr nanometru je v jejich tloušťce.
- c) **Vláknitá** – rozměr nanometru je v jejich průměru.

- d) **Nanotrubičky** – jedná se o uhlíkové nanotrubičky, které mají uspořádání uhlíku v jedné stěně nebo ve více stěnách. Modul pružnosti dosahuje až stonásobku modulu pružnosti u oceli – používá se pro konstrukční materiály. [12]

## 2.4. Duté skleněné kuličky

Jak už bylo zmíněno v základním rozdělení plniv, často využívaný tvar pro plniva je tvar koule. Tento tvar má ze všech těles při daném objemu nejmenší povrch, proto se tato plniva dobře mísí, nezpůsobují koncentrace napětí, zároveň zvyšují rozměrovou stabilitu a odolnost proti rázům. Tyto kuličky můžeme rozdělit na **plné** nebo **duté**. [17]

Plné částice jako plnivo v materiálu ale většinou zvyšují hmotnost dílu, proto se začalo využívat hlavně dutých skleněných kuliček o určité tloušťce stěny, které tento problém eliminují. Z tohoto důvodu se další text bude věnovat pouze dutým skleněným kuličkám, stejně tak i všechna měření v praktické části práce. [10,12]



Obr. 2.4.1: Porovnání velikosti skleněných kuliček [17]



U dutých skleněných kuliček pochopitelně záleží na materiálu, ze kterého jsou vyrobeny, jejich objemu a tloušťce jejich stěny. Problémy mohou nastat s příliš malou tloušťkou stěny, kdy se mohou snadno rozbít (nejčastěji se využívají duté kuličky s tloušťkou stěny od 0,4 až 1,5  $\mu\text{m}$ ). Při nízké viskozitě mají tendenci migrovat k povrchu, čímž dochází ke špatné distribuci rozložení kuliček. [12]

Velikost dutých skleněných kuliček se pohybuje od 15 do 65 mikronů. Jejich hustota je od 0,12 do 0,60  $\text{g/cm}^3$ . Odolnost vůči tlaku je v rozmezí 1,7 MPa až 200 MPa v závislosti na tloušťce stěny. Tvrdost na Mohsově stupnici tvrdosti je 5 (např. mastek má 1, diamant má 10). Materiály se kuličkami plní v koncentraci 10 až 50 objemových procent. Tyto kuličky jsou zároveň částečně vakuované a jejich tvar dokonale opisuje koule. [12,18]

### 2.4.1. Výroba

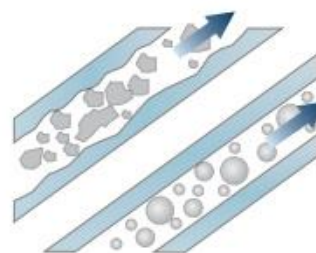
Plné skleněné kuličky se vyrábějí se z borosilikátového nebo sodno-boro-křemičitého skla, které se rozdrtí na mikročástice a tyto částice projdou zahříváním, kterým získají kulový tvar. Výroba dutých skleněných kuliček je obdobná, navíc ale obsahuje proces, kdy se vlivem činidla obsaženým ve skle nafoukne jejich vnitřní dutina tlakem zhruba 1/3 atmosféry (díky tomu mají nízkou hustotu). [12]

### 2.4.2. Výhody

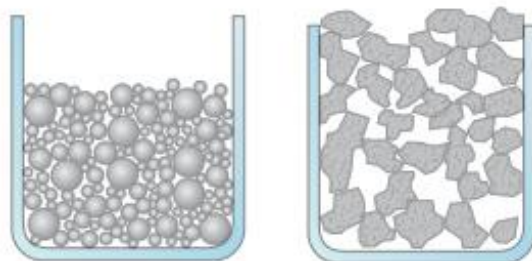
Hlavní výhody dutých skleněných kuliček jsou následující:

- Díky **kulovitému tvaru** snížíme spotřebu polymeru, zvýšíme tím mísitelnost, získáme tzv. efekt kuličkového ložiska (viz. obr. 2.4.2.1), kterým zlepšíme tekutost. Dosáhneme nižší viskozity, menšího smršťování materiálů, snížíme spotřebu pojiv (viz. obr. 2.4.2.2) a navíc se díky tomuto tvaru zlepšuje rozměrová stabilita. [19]

Na rozdíl od plniv nepravidelných tvarů, se skleněné kuličky v tavenině přes sebe „valí“ snadněji. [20]



Obr. 2.4.2.1: Efekt kuličkového ložiska [20]



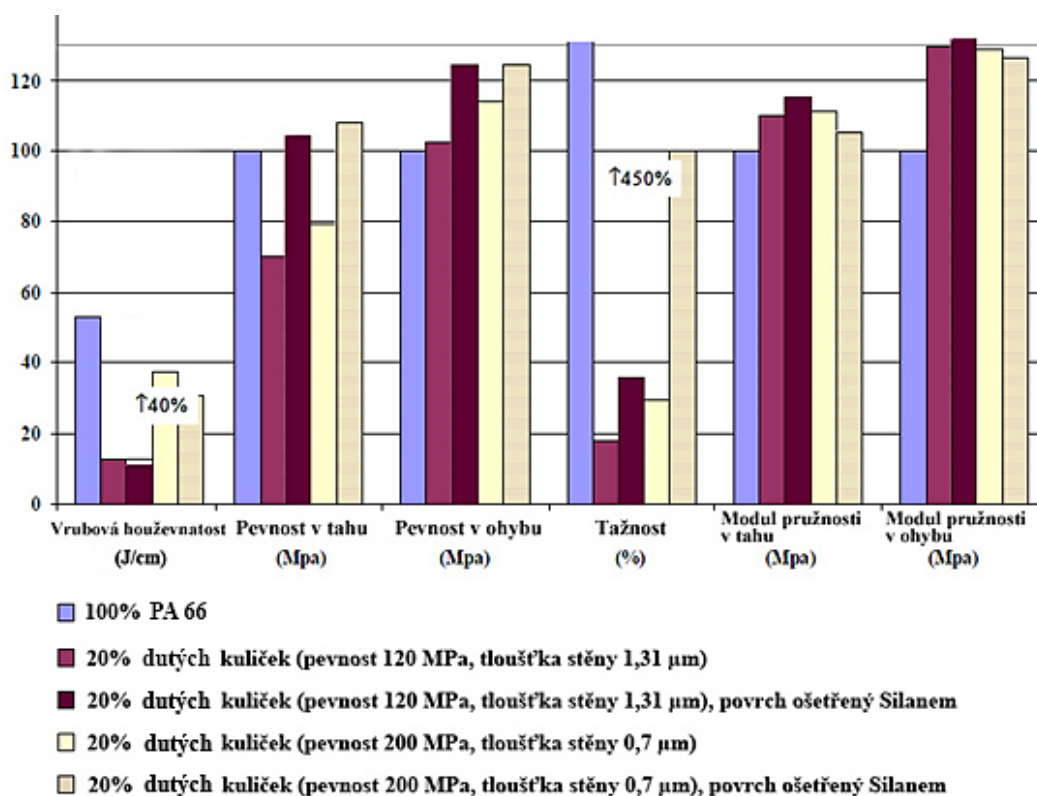
Obr. 2.4.2.2: Srovnání plniva ve formě kuliček a plniva nepravidelného tvaru [20]

- **Nízká hustota** dutých kuliček zajišťuje nižší hmotnost finálních výrobků.
- Vlivem **chemicky stálého** skla získáme nízkou alkalitu, která bude podobná většině polymerů, možnost dlouhodobé skladovatelnosti a nehořlavost. Díky tomu, že takovéto sklo je neporézní, neabsorbuje vodu a má vůči ní vynikající odolnost. Proto také vytváří stabilní emulze. Chemická odolnost nám navíc zaručuje malý podíl těkavých látek (cca 0,5 % hmotnosti nebo méně), dobrou tekutost – skleněné kuličky zůstávají tekuté minimálně po dobu jednoho roku (za předpokladu, že jsou skladovány v původním neotevřeném obalu za minimálních skladovacích podmínek nevytápěného skladu). [18,20]
- Skleněné kuličky zároveň vykazují velkou odolnost vůči tlaku. U dutých kuliček je odolnost závislá na tloušťce stěny. [21]

V dalším textu jsou uvedeny výrobcem deklarované konkrétní hodnoty při použití kompozitu s dutými skleněnými kuličkami, které představují zlepšení užitečných vlastností výsledného plastového dílu. Některé z těchto hodnot budou dále popsány a zkoumány v experimentální části práce.

## 1) Zlepšení mechanických vlastností

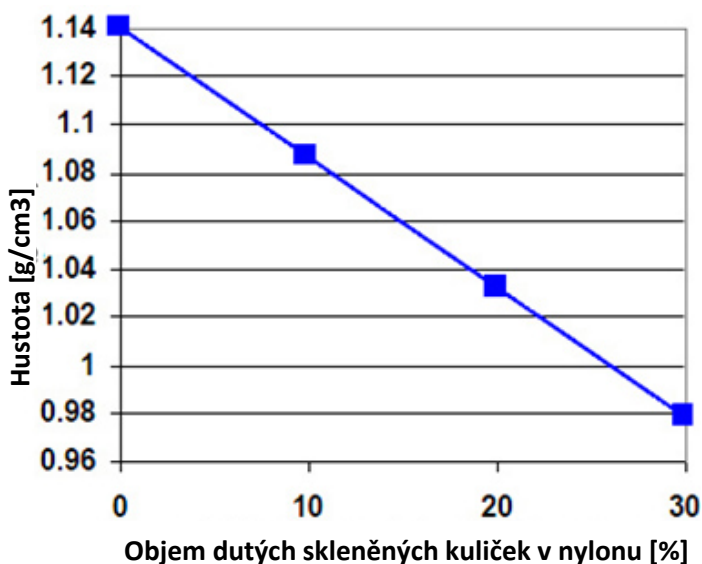
Díky své vysoké pevnosti duté skleněné kuličky snižují spotřebu pojiv a zkracují výrobní cyklus. Zároveň omezují množství odpadu. Vzorky ošetřené silanem vykazují lepší mechanické vlastnosti z důvodu zlepšení adheze mezi povrchem kuliček a matricí (viz. graf 2.4.2.1). [2,19]



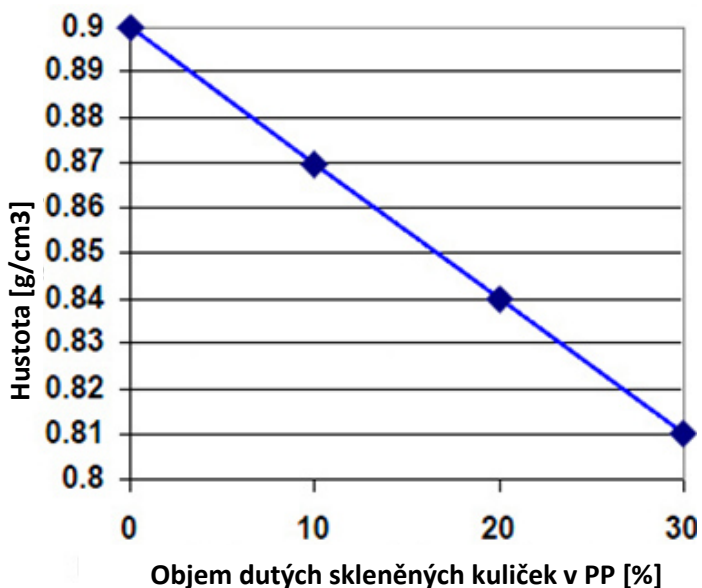
Graf 2.4.2.1: Zlepšení mechanických vlastností materiálu polyamid 66 přidáním dutých skleněných kuliček různých pevností a tloušťky stěny. [19]

## 2) Snížení hustoty

Přidáním dutých skleněných kuliček dojde ke snížení hustoty o 5 až 15 % (viz. graf 2.4.2.2 a 2.4.2.3).



Graf 2.4.2.2: Závislost hustoty na objemu dutých kuliček v materiálu nylon. [21]



Graf 2.4.2.3: Závislost hustoty na objemu dutých kuliček v materiálu polypropylen. [21]

### 3) Snížení hmotnosti

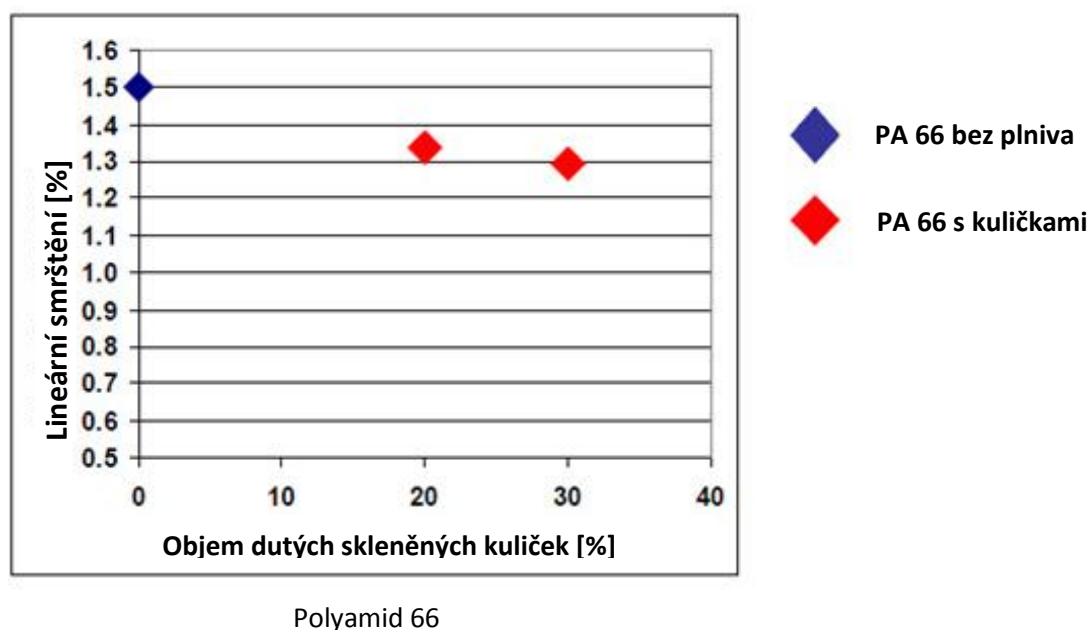
Díky nízké hustotě dosahují materiály s dutými skleněnými kuličkami nízké hmotnosti. U některých materiálů činí úspora hmotnosti až 25 % (viz. tab. 2.4.2.1).

Tab. 2.4.2.1: Příklady redukce hmotnosti pro některé materiály při plnění dutými skleněnými kuličkami. [21]

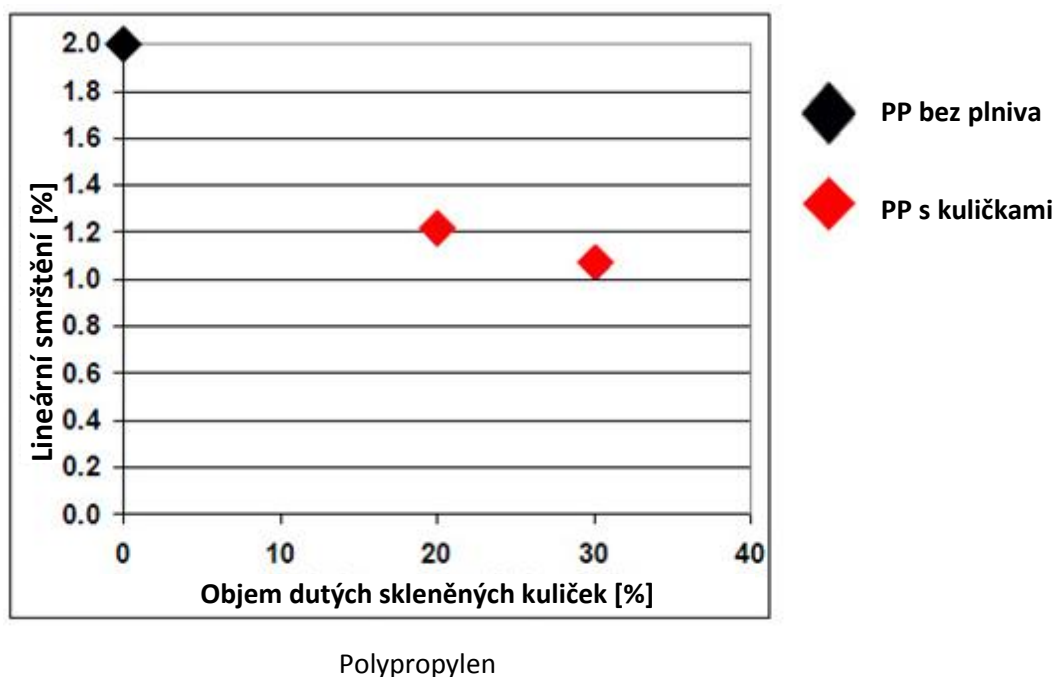
Materiál	Hmotnost plniva [%]	Objem plniva [%]	Snížení hmotnosti [%]
PC/ABS	15	26	13
PC + kuličky (20 % objemu)	15	29	17
PA 66	15	14	12
POM	15	29	17
PVDF	15	36	25

### 4) Snížení smrštění

S rostoucím zastoupením dutých skleněných kuliček se zvětšuje rozměrová stabilita výrobku (viz. graf 2.4.2.4 a 2.4.2.5).

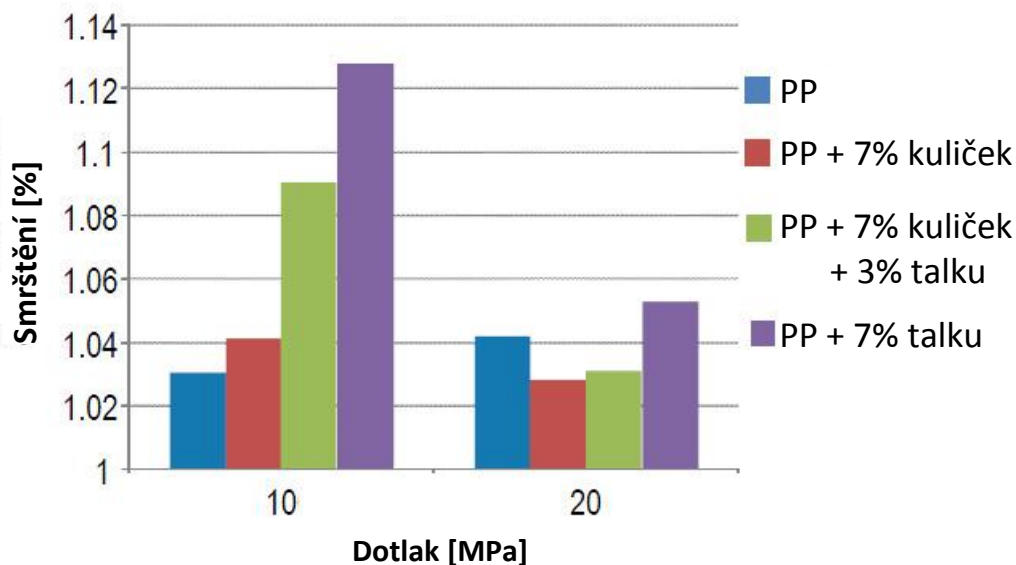


Graf 2.4.2.4: Vliv dutých skleněných kuliček na smrštění v polyamidu 66. [21]



Graf 2.4.2.5: Vliv dutých skleněných kuliček na smrštění v polypropylenů. [21]

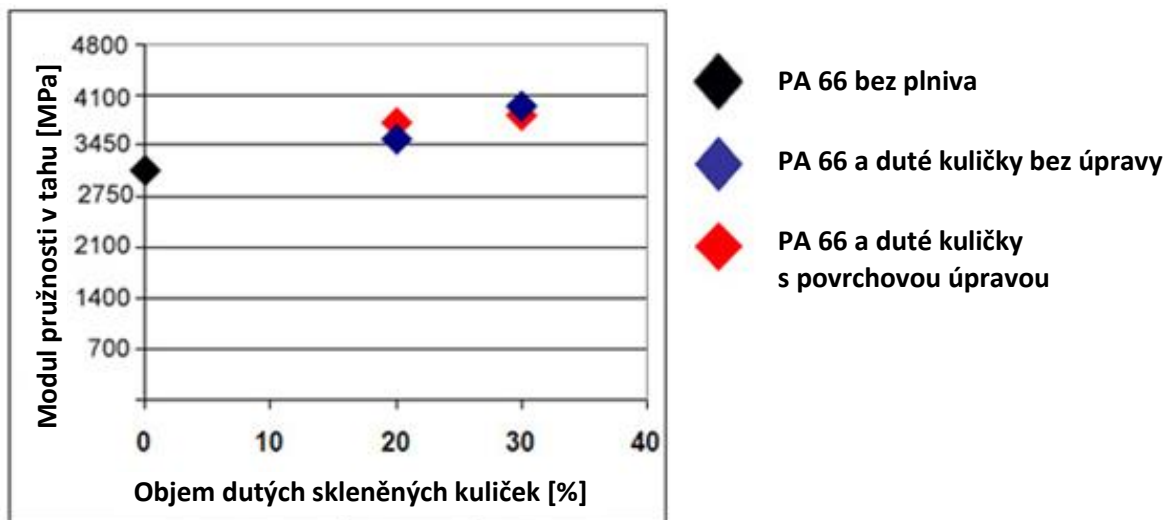
Rozdíl mezi smrštěním výrobku, kde je plnivo talek a duté skleněné kuličky je uveden v grafu 2.4.2.6.



Graf 2.4.2.6: Rozdíly smrštění polypropylenů s talkem a polypropylenů se skleněnými kuličkami. [21]

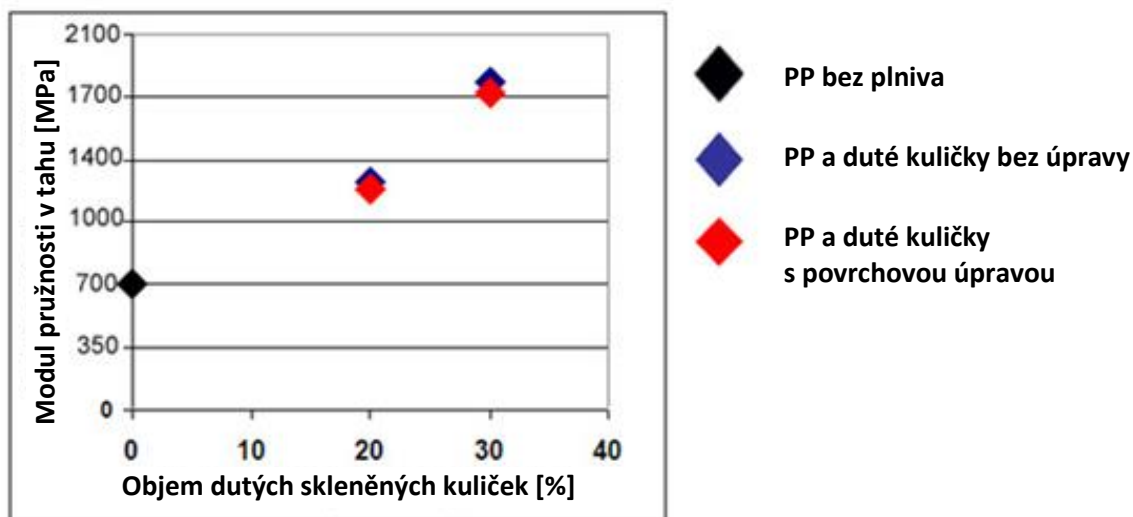
## 5) Zvýšení Youngova modulu pružnosti

Použití plniva ve formě skleněných kuliček má za následek zvýšení modulu pružnosti v tahu.



Polyamid 66

Graf 2.4.2.7: Vliv skleněných kuliček na modul pružnosti v materiálu polyamid 66. [21]

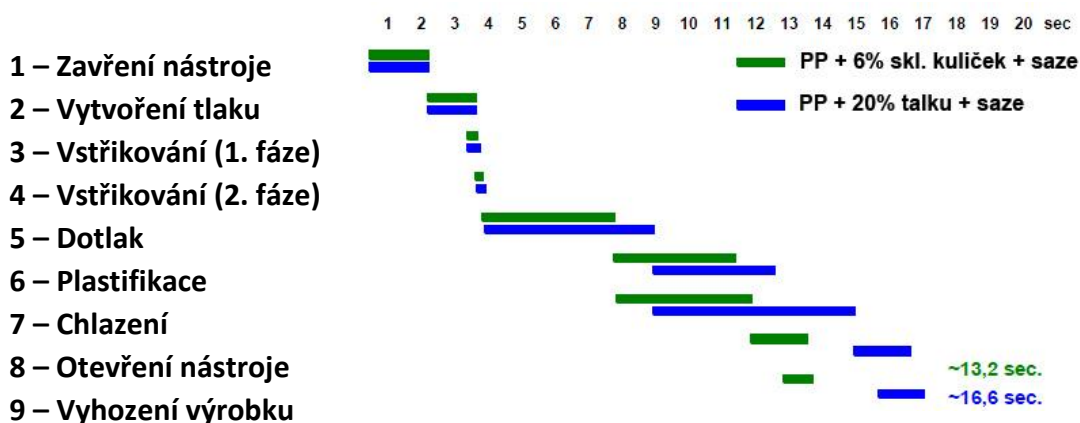


Polypropylen

Graf 2.4.2.8: Vliv dutých skleněných kuliček na modul pružnosti v materiálu polypropylen. [21]

## 1) Zkrácení výrobního cyklu

Díky použití skleněných kuliček můžeme docílit i zkrácení výrobních časů. Zejména ve fázi dotlaku a chlazení (viz. obr. 2.4.2.3).



Obr. 2.4.2.3: Výrobní časy pro vstřikování stejného dílu za použití standardního materiálu polypropylen s 20 objemovými % talku a sazí a s polypropylenem plněným 6 objemovými % skleněných kuliček a sazí. [21]

## 2.5. Shrnutí vlivů některých plniv na vlastnosti výrobku

Různé druhy plniv mají také různý vliv na výsledné vlastnosti materiálu. Níže jsou uvedeny vlivy plniv, jako je kaučuk, skleněná vlákna a skleněné kuličky v materiálu, kde matricí je polypropylen. Výhody jsou označeny zeleně, nevýhody červeně.

### • Kaučuk

- Na hustotu nemá velký vliv,
- modul pružnosti klesá,
- pevnost v tahu klesá,
- rázová houževnatost se zvyšuje,
- teplota tvarové stálosti se snižuje
- smrštění vzrůstá,
- deformace dílů vzrůstá.

### • Skleněná vlákna

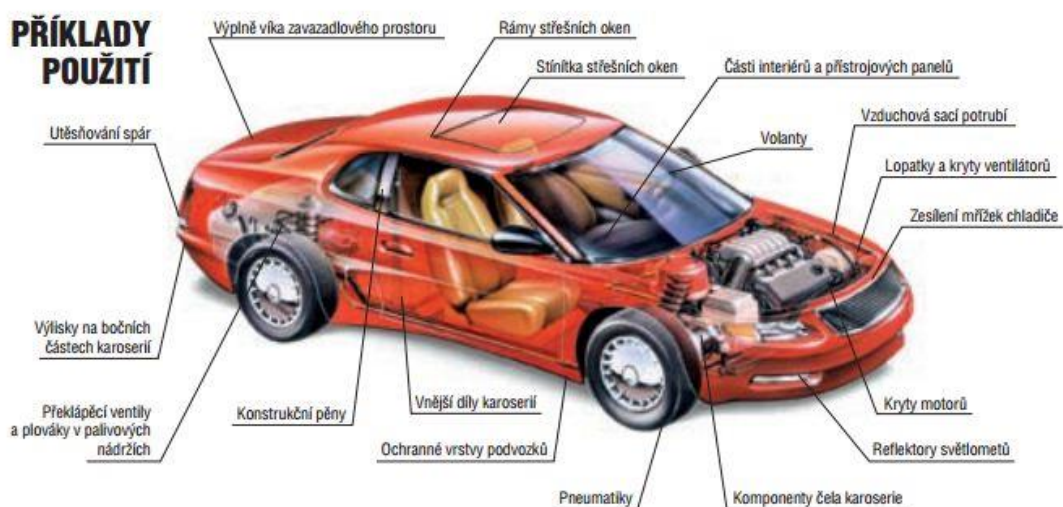
- Hustota se zvyšuje,
- modul pružnosti se zvyšuje,
- pevnost v tahu vzrůstá,
- rázová houževnatost se zvyšuje (závisí na množství, orientaci vláken a na jejich soudržnosti),



- teplota tvarové stálosti se zvyšuje,
  - odolnost proti poškrábání se zvyšuje,
  - smrštění klesá,
  - dochází ke změně anizotropie,
  - deformace dílů vzrůstá.
- **Duté skleněné kuličky**
    - Hustota se snižuje,
    - modul pružnosti se zvyšuje,
    - pevnost v tahu klesá,
    - rázová houževnatost klesá,
    - teplota tvarové stálosti se zvyšuje,
    - odolnost proti poškrábání se zvyšuje,
    - smrštění klesá,
    - deformace dílů se snižuje. [17,21]

## 2.6. Aplikace

Pro svou extrémně nízkou hmotnost a dobré mechanické vlastnosti se duté skleněné kuličky nejčastěji používají v automobilovém průmyslu (viz. obr. 2.6.1). Využití najdou při výrobě automobilových součástek včetně termoplastů (zde se může uplatnit jejich velká výhoda – možnost plynulé regulace hustoty materiálu podle naší potřeby). Termoplastové součástky obsahující skleněné kuličky umožňují nahradit kovové komponenty pohonného systému, karoserií i interiéru.



Obr. 2.6.1: Příklady aplikací skleněných kuliček v součástkách automobilu.

[22]

Konkrétně u interiéru našly uplatnění skleněné kuličky u komponent přístrojové desky vozů Hyundai, kdy směs PC/ABS byla nahrazena polypropylenem plněným skleněnými kuličkami. Výsledné vlastnosti předčily polymerní směs PC s ABS ve snížení celkové hmotnosti, kdy úspora hmotnosti dosáhla 16,8 %. Také došlo i ke snížení výrobních nákladů, které klesly o 50 % a zlepšení tekutosti materiálu. [22]

Snížení hmotnosti jednotlivých dílů automobilu se může kladně projevit na jeho spotřebě paliva. Podle německé publikace „SWR-ARD Ratgeber Auto“ každých 100kg hmotnosti automobilu zvýší spotřebu o 0,6 litru na 100 kilometrů. Z této publikace, která testovala využití skleněných kuliček na určitém typu automobilu, vyšel závěr, že pokud bychom při výrobě všech plastových součástí v automobilu použili skleněné kuličky o hustotě  $0,6\text{g/cm}^3$ , znamenalo by to snížení hmotnosti celého vozu o 33,8 kg, což by při průměrné spotřebě paliva tohoto typu automobilu 7,8 litrů na 100 kilometrů, činilo úsporu paliva asi 2,6 %. Zároveň by došlo i ke snížení emisí  $\text{CO}_2$ .

Od běžných plniv kuličky umožňují vyrábět lehčí a homogennější součástky z ABS, POM, PA a dalších termoplastů. Další aplikace je pro kompozitní materiály jako jsou SMC (lisovací technologie, kterým vznikne vlákný ohebný polotovar k výrobě vláknitých kompozitů ze směsi matrice, vláken, vyztužujících přísad, plniv a dalších aditiv pro lisování) – viz. obr. 2.6.2, nebo BMC (lisovací technologie, kde směs tvoří pryskyřice a krátká vlákna). [22,23]



Obr. 2.6.2: Porovnání hmotnosti reflektorů vyrobených bez a se skleněnými kuličkami. [22]

Další aplikace dutých skleněných kuliček se najde pro konstrukční pěny a výplně nebo pro ochranné vrstvy k podvozkovým komponentům. U „plastisolů“, které chrání podvozek a zakrývají svary, dochází k úspoře až 50 % hmotnosti. Skleněné kuličky se hodí se i pro náročné aplikace, kde chceme snížit riziko koroze, protože díky svému kulovitému tvaru na sebe kuličky v „plastisolové“ vrstvě těsně přiléhají a tím pomáhají bránit průniku materiálů, které způsobují korozi. [22]

Některé konkrétní příklady aplikací dutých skleněných kuliček v automobilovém průmyslu v poslední době (viz. obr. 2.6.3-2.6.5):



Obr. 2.6.3: Kryt světlometu, aplikace z roku 2011. [24]



Obr. 2.6.4: A a B sloupky automobilu. Kombinace PET vláken, „whiskerů“ a skleněných kuliček. Aplikace z roku 2012. [24]



Obr. 2.6.5: Lišta dveří z interiéru automobilu, aplikace z roku 2012. [24]

Nejen v automobilovém, ale i v leteckém průmyslu se najde využití skleněných kuliček. Také u letadel je kladen důraz na nízkou hmotnost dílů, která se ve výsledku projeví na snížení spotřeby paliva. Proto se i díly interiérů letadel začaly vyrábět s plnivem dutých kuliček.



Například jejich použití firmou Rehau u systému madeľ, držáků a zábradlí v Airbusu A320 (viz. obr. 2.6.6) znamenalo snížení hmotnosti o více než 5 kg, což se ve výsledku projevilo v roční úspoře paliva cca 1000 litrů. [25]

Obr. 2.6.6: Díly interiéru letadla plněný dutými kuličkami [25]

Kromě automobilového a leteckého průmyslu se duté skleněné kuličky dají aplikovat i pro stavební průmysl. Využití najdou jako nátěry a potahové vrstvy, protože jsou schopny snížit tepelnou vodivost díky tomu, že jsou duté a vakuované. Tím snižují kondenzaci pokojové vlhkosti, která se vytváří ve studených místech stěn. Díky tomu se stěny jeví na dotek více teplé a dochází u nich k menšímu proudění vzduchu. Své uplatnění proto najdou jako antikondenzační nátěry stěn místností s vysokou vlhkostí jako jsou koupelny, kuchyně, plovárny atd. Kuličky jsou schopny také zabraňovat srážení, praskání a sesedání směsí při vyplňování otvorů a různých prasklin ve stěnách a stropích. Rovněž se uplatňují i jako dekorace například u polyesterových pryskyřic a silikonových těsnících rámců u oken a dveří díky svému hřejivému efektu, snadné zpracovatelnosti a efektu imitace dřeva. [26]

### 3. Praktická část

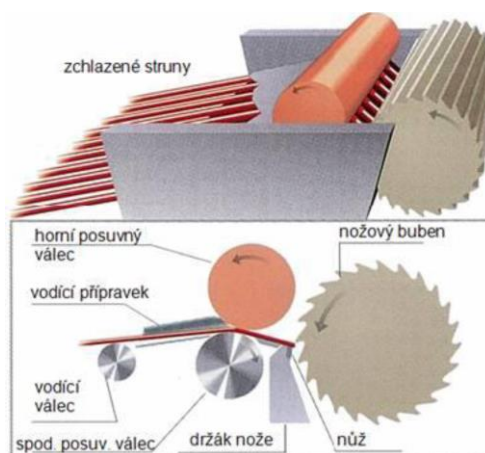
#### 3.1. Příprava zkušebních vzorků

Cílem praktické části diplomové práce bylo vyhodnocení vybraných vlastností a vyhodnocení ekonomické stránky použití dutých skleněných kuliček o různých procentuálních zastoupeních v matrici polypropylenu a polypropylenu plněného talkem. V průběhu řešení práce byl kladen důraz na nalezení nejvhodnějšího procentuálního zastoupení dutých skleněných kuliček v kompozitu z hlediska konečných užitných vlastností plastových dílů a z hlediska aplikovatelnosti ve výrobě plastových dílů. Součástí práce je i porovnání vlastností plněného materiálu vůči neplněnému.

Prvním krokem pro splnění tohoto cíle byla výroba granulátu kompozitu z matrice a dutých skleněných kuliček.

##### 3.1.2. Granulace

Konečným stupněm přípravného zpracování před výrobou zkušebních těles byla granulace, kdy matrice naplněná dutými skleněnými kuličkami a aditivem pro zvýšení adheze, získává tvar granulí, který je vhodný pro další zpracování z hlediska sytné hmotnosti. Existují různé metody granulace. My jsme použili technologii strunové granulace za studena, kdy jsou struny vytlačené přes granulační hlavu s mnoha



Obr. 3.1.2.1: Princip strunové granulace za studena [27]

otvory ochlazeny ve vodní lázni a následně nasekány na granule. Tzv. studená granulace ze strun se doporučuje jako nejvhodnější pro kompaundaci a granulaci kompozitů s termoplastickými matricemi plněnými



kulovitým plnivem a to jak z hlediska výkonnosti této technologie, tak i z hlediska kvality výsledného produktu, granulátu. Schematicky je proces granulace uveden na obr. 3.1.2.1.

Ke granulaci byla použita linka ZAMAK EHP-2x130di s dvoušnekovým extruderem, segmentovými šneky s možností proměnné délky šneků a plastikační komory, granulační hlavou na struny, vodní lázní s vodícími válečky, ventilátorem a nožovým mlýnem s podavači na sekání struny (viz. obr. 3.1.2.2). Z důvodu velmi rozdílné hmotnosti dutých skleněných kuliček a matrice bylo nutné kuličky dávkovat pomocí postranního podavače značky ZAMAK.



Obr. 3.1.2.2: Zařízení použité pro granulaci [28]

Vstupní surovinou pro granulaci byl jeden ze dvou typů dutých skleněných kuliček (typ iM16K nebo iM30K) o různém hmotnostním procentuálním zastoupení, polymerní termoplastická matrice (polypropylen Sumika E020M00S nebo polypropylen s 15% příměsí talku Sumika D320G02) a aditiva zvyšující adhezi mezi dutými skleněnými kuličkami a polymerní termoplastickou matricí. Materiálové vlastnosti matricí a plniv jsou uvedeny v tabulkách 3.1.2.1 až 3.1.2.3.



Tab. 3.1.2.1: Vlastnosti dutých skleněných kuliček z jejich materiálových listů.  
[29,30]

	Metoda	iM16K	iM30K
Pevnost v tlaku [MPa]	3M QCM 14.1.8	110	190
Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	3M QCM 14.24.1	0,46	0,60
Průměr [μm]	3M QCM 193.0	20	18

Tab. 3.1.2.2: Vlastnosti matrice PP (Sumika E020M00S) z materiálového listu. [31]

	Metoda	Hodnota
Specifická hmotnost SG [-]	ASTM D732	0,90
Index toku taveniny MFI [g/10min]	ASTM D1256	30
Pevnost v tahu [MPa]	ASTM D638M	26
Prodloužení při přetržení [%]	ASTM D638M	80
Modul pružnosti v tahu [GPa]	ASTM D638M	-
Pevnost v ohybu [MPa]	ASTM D790D	33
Modul pružnosti v ohybu [GPa]	ASTM D790M	1.3
Vrubová houževnatost Izod [J/m]	ASTM D256	100
Vrubová houževnatost Izod [J/m] (-30 °C)	ASTM D256	62
Tepelná odolnost [°C]	ASTM D648/0.46 MPa	113



Tab. 3.1.2.3: Vlastnosti matrice PP + 15 % talek (Sumika D320G02)  
z materiálového listu. [32]

	Metoda	Hodnota
Specifická hmotnost SG [-]	ASTM D732	0,997
Index toku taveniny MFI [g/10min]	ASTM D1256	30
Pevnost v tahu [MPa]	ASTM D638M	21,2
Prodloužení při přetržení [%]	ASTM D638M	500
Modul pružnosti v tahu [GPa]	ASTM D638M	-
Pevnost v ohybu [MPa]	ASTM D790D	27
Modul pružnosti v ohybu [GPa]	ASTM D790M	1.6
Vrubová houževnatost Izod [J/m]	ASTM D256	550
Vrubová houževnatost Izod [J/m] (-30 °C)	ASTM D256	46
Tepelná odolnost [°C]	ASTM D648/0.46 MPa	121

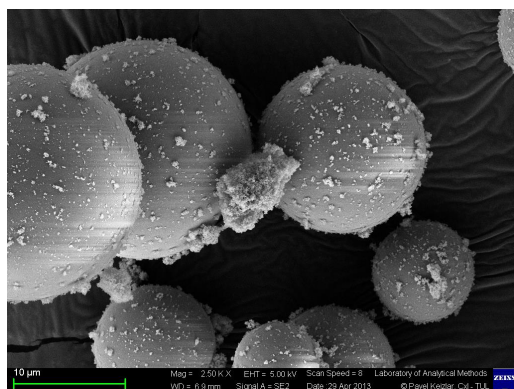
Typ aditiva byl zvolen Fusabond od firmy Dupont v zastoupení 4 % hmotnosti a byl dávkován do polymerní matrice jejich smísením přímo s granulátem polymerní matrice před přidáním dutých skleněných kuliček. Celkem tak bylo připraveno čtrnáct různých druhů granulátů:

- 1) PP,
- 2) PP + 15 % talku,
- 3) PP + 10 % kuliček iM16K,
- 4) PP + 15 % kuliček iM16K,
- 5) PP + 20 % kuliček iM16K,
- 6) PP + 15 % talku + 10 % kuliček iM16K,
- 7) PP + 15 % talku + 15 % kuliček iM16K,
- 8) PP + 15 % talku + 20 % kuliček iM16K,
- 9) PP + 10 % kuliček iM30K,
- 10) PP + 15 % kuliček iM30K,

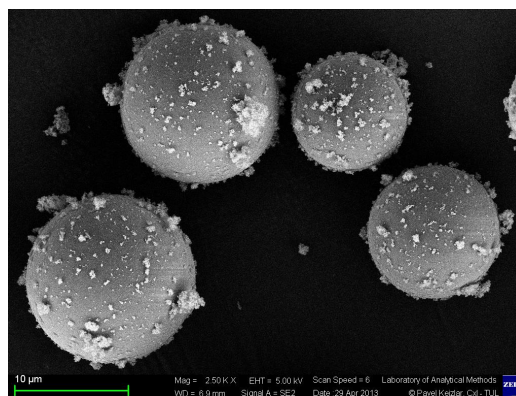


- 11) PP + 20 % kuliček iM30K,
- 12) PP + 15 % talku + 10 % kuliček iM30K,
- 13) PP + 15 % talku + 15 % kuliček iM30K,
- 14) PP + 15 % talku + 20 % kuliček iM30K.

Před výrobou granulátů byla ještě ověřena celistvost samotných kuliček, která je deklarována výrobcem, pomocí elektronového mikroskopu (viz. obr. 3.1.2.3 a 3.1.2.4).

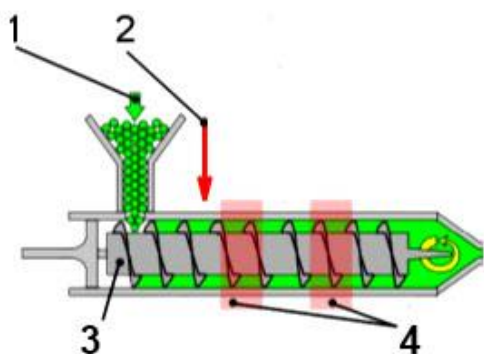


Obr. 3.1.2.3: Snímek dutých skleněných kuliček typu iM16K [16]



Obr. 3.1.2.4: Snímek dutých skleněných kuliček typu iM30K [16]

Dávkování kuliček bylo možné provést v následných zónách po provedeném dávkování aditiva. Jednalo se celkem o pět možností umístění dávkovací jednotky. Bylo provedeno dost experimentů pro určení místa dávkování kuliček, ale jako nejvhodnější se ukázalo dávkování co nejbližší přední pozici šneku (viz obr. 3.1.2.5). Důvodem dávkování kuliček v předních partiích šneku extruderu (v blízkosti granulační hlavy) je snaha zabránit mechanickému nebo teplotnímu poškození či degradaci kuliček.



Obr. 3.1.2.5: Schematický nákres míst pro dávkování matrice a kuliček [16].

1 – vstup granulátu polymerní termoplastické matrice, 2 – místo dávkování dutých skleněných kuliček, 3 – šnek extruderu, 4 – míchací zóny 1 a 2



Obr. 3.1.2.6: Vlevo – duté skleněné kuličky, vpravo granulát PP s 15 % talku) [16]

Výsledek granulace dutých skleněných kuliček a matrice polypropylenů s talkem (viz. obr. 3.1.2.6) byl kompozit ve formě granulí válečkovitého tvaru (viz obr. 3.1.2.7).



Obr. 3.1.2.7. Výstupní produkt granulace [16]

Technologické parametry procesu se týkaly všech částí granulační linky. Ve všech případech jsme používali otáčky šneku extruderu  $300 \text{ min}^{-1}$ . Otáčky šneku extruderu bylo nutné zvolit tak, aby se vytlačovaná struna nepohybovala příliš rychle a doba, kterou struna setrvá ve vodní lázni, nebyla příliš krátká. Teploty tavící komory extruderu jsou jednak závislé na přechodových teplotách a teplotě degradace syntetické matrice, jednak jsou závislé na indexu toku taveniny (MVR) a jednak jsou závislé na teplotní odolnosti dutých skleněných kuliček. Teplota v jednotlivých zónách tavící komory byla nastavena na  $170 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , kromě zóny pod násypkou, kde byla zvolena teplota  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , aby nedocházelo k natahování struny, a kromě posledních dvou zón, u vytlačovací hlavy a u příruby, kde byla teplota  $175 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Doporučená teplota chladicího média ve vodní lázni (vody) je  $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Při vyšších než doporučených teplotách může docházet k nedokonalému sekání struny na granule. Rychlost nože sekacího mlýna byla nastavena na hodnotu  $10 \text{ m/min}$  a výsledná granule pak měla délku  $3,5 \text{ mm}$ .

### 3.1.3. Výroba zkušebních těles

Po výrobě granulátu následovala výroba zkušebních těles pro hodnocení vybraných vlastností připravených kompozitů, a to technologií vstřikování, kterou lze zpracovávat i kompozitní materiály s rozdílným typem plniv.

Doporučené technologické parametry pro vstřikování zkušebních těles musely zajistit jednak výrobu vzorků a jednak nesmělo dojít k popraskání dutých skleněných kuliček. Jednou ze zpracovatelských výhod dutých skleněných kuliček je jejich vysoká teplotní odolnost (cca do  $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), proto by z hlediska teploty taveniny nemělo dojít k jejich destrukci, protože teplota vstřikování základního termoplastického materiálu nedosáhne takto vysokých teplot. Na základě provedených pokusů a výzkumných prací byl doporučen konstantní teplotní profil tavící komory vstřikovacího stroje (viz. tab. 3.1.3.1). Teplota formy splňovala příslušnou normu a byla na teplotě  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

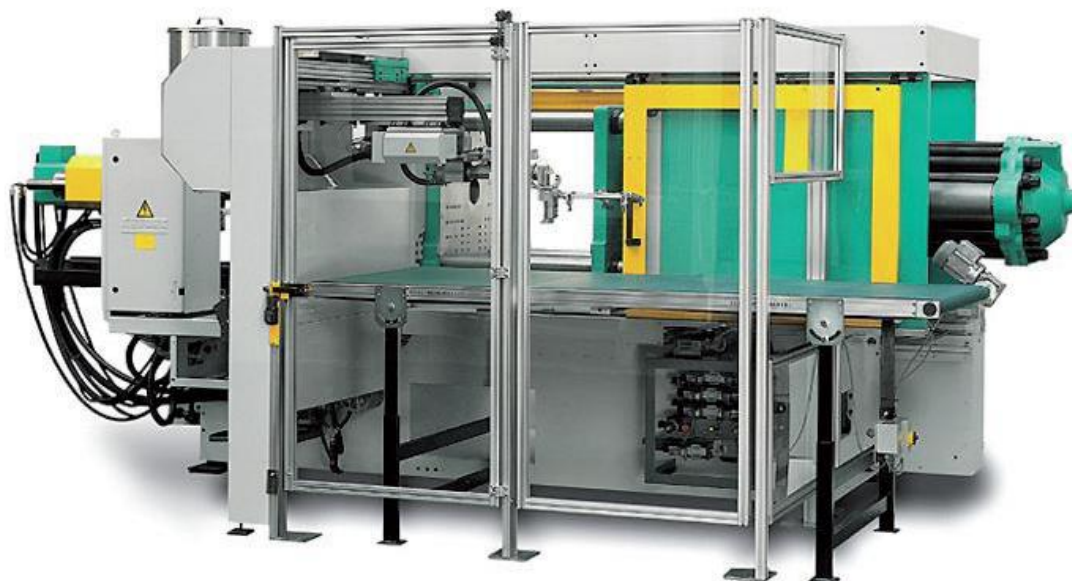
Tab. 3.1.3.1: Zvolené teploty plastikace v jednotlivých zónách tavící komory vstřikovacího stroje pro kompozity se syntetickou matricí a dutými skleněnými kuličkami.

	tryska	1. zóna	2. zóna	3. zóna	4. zóna	násypka
Teplota [°C]	220	215	210	210	200	40

Velikost vstřikovacího tlaku (vstřikovací rychlost), velikost a dobu dotlaku jsme volili na základě standardů platných pro vstřikování termoplastických materiálů. Velikost dotlaku při vstřikování zkušebních těles, která je stanovena normou ISO 294 [33] a má být 50 až 70% velikosti vstřikovacího tlaku, byla 440 barů a při přepnutí byla shodná se vstřikovacím tlakem (viz. tab. 3.1.3.2). Doba dotlaku pro výrobu zkušebních těles byla dodržena dle normy ISO 294 a činila 40 s. Celková doba cyklu pak trvala 60 s. Objem dekomprese byl 4 cm<sup>3</sup>, protitlak byl nastaven na 50 barů, bod pro přepnutí byl zvolen při objemu 21 cm<sup>3</sup>. Celková velikost dávky činila 45 cm<sup>3</sup> a rychlost vstřiku byla 45 cm<sup>3</sup>/s. Ke vstřikování byl použit standardní vstřikovací stroj. K dispozici jsme měli vstřikovací stroj sloupové konstrukce ARBURG 270S 400-100, viz obr. 3.1.3.1. Pro temperaci vstřikovací formy byl použit agregát TA3. Parametry stroje jsou uvedeny v tabulce 3.1.3.3.

Tab. 3.1.3.2: Tlaky vstřikovacího cyklu.

Vstřikovací tlak [bar]	Dotlak [bar]	Tlak při přepnutí [bar]	Protitlak [bar]
750	440	440	50



Obr. 3.1.3.1: Vstřikovací stroj ARBURG 270S 400-100 [16]

Tab. 3.1.3.3: Parametry vstřikovacího stroje ARBURG 270S 400-100

<b>Vstřikovací jednotka</b>				
Průměr šneku	mm	20	25	30
Délka šneku	L/D	25	20	16,7
Zdvih dávkování	mm		100	
Otáčky šneku max.	m/min <sup>-1</sup>	28	35	42
Plastifikační výkon měřeno pro PS podle norem	kg/hod	5,5	8	9,5
Vstřikované množství teoretické hodnoty	cm <sup>3</sup> /s	64	100	146
Maximální objem zdvihu	cm <sup>3</sup>	31	49	71
Max. hmotnost vylisku, vztaženo na PS (Euromap 19)	g	29	45	65
Specifický vstřikovací tlak	bar	2500	2000	1390
Zvýšený specifický vstřikovací tlak	bar			
Zdvih agregátu × přídržná síla trysky	mm×kN		180 ×	



			50	
Instalovaný příkon topení plastifikačního válce	kW		4,9	
Počet topných pásů			4	
<b>Uzavírací jednotka</b>				
Uzavírací síla	kN		400	
Dráha otevření lisovacího nástroje	mm		350	
Vestavěná výška formy min	mm		200	
Max. otevření upínacích desek	mm		500	
Velikost upínacích desek horizontální × vertikální	mm		380 x 380	
Zvětšené upínací desky horizontální × vertikální	mm		380 x 380	
Vzdálenost mezi sloupky horizontální × vertikální	mm		270 x270	
Šířka vypadávací šachty	mm		300	
Zdvih vyhazovače × síla vyhazovače	mm×kN		100 x 20	
Běh naprázdno dle Euromap 6 x zdvih	s x mm		1, 2 x 189	

K výrobě zkušebních těles byla použita vstřikovací forma, která měla výměnné vložky podle požadavků a standardů jednotlivých norem ISO (viz. obr. 3.1.3.2). Velmi snadným způsobem se tak daly vyměnit vložky pro výrobu zkušebních těles pro tahovou zkoušku, pro ohybovou zkoušku, pro zkoušky vrubové houževnatosti, apod.





Obr. 3.1.3.2: Příklady výměnných vložek vstřikovací formy pro výrobu zkušebních těles [16]

### 3.2. Výzkum vlastností polymeru s dutými skleněnými kuličkami

V předchozích kapitolách byly popsány činnosti, které vedly výrobě granulátu s rozdílným typem matrice, procentuálním objemem a s rozdílným typem kuliček a k výrobě zkušebních těles.

Dalším krokem byl výzkum užitných vlastností připravených kompozitů v závislosti na typu a poměru matrice/duté skleněné kuličky a jejich porovnání s polymery neplněnými skleněnými kuličkami.



### 3.2.1 Použitá zkušební zařízení a pomůcky

Připravené zkušební vzorky byly hodnoceny následujícími laboratorními zařízeními a pomůckami:

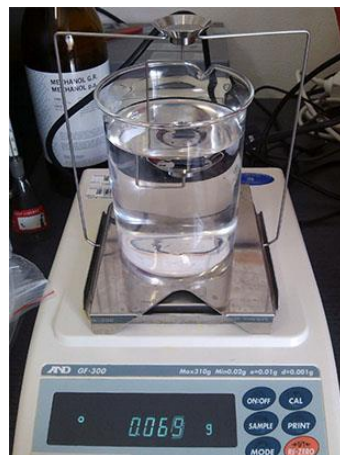
- 1) **Stanovení hustoty imerzní metodou** bylo provedeno digitální váhou AND G 300 (přesnost vážení na 0,001 g), kádinkou a imerzní kapalinou.
- 2) **Stanovení tahových vlastností a stanovení ohybových vlastností** pomocí trhacího stroje HOUNSFIELD H10KT s průtahoměrem 100RS a digitální posuvky Mitutoyo s přesností 0,01 mm. Pro měření modulu pružnosti v tahu byl pak použit trhací stroj TIRA test 2300 s průtahoměrem Epsilon CCPP.
- 3) **Stanovení rázové a vrubové houževnatosti** bylo provedeno zařízením Resil 5.5J CEAST včetně softwarového vybavení WINMFT, rázovým kládívem Charpy s příslušnou potenciální energií, mechanickou vrubovačkou CEAST s digitálním mikrometrem s přesností 0,001 mm a digitální posuvkou s přesností 0,01 mm.
- 4) **DSC analýza** byla provedena pomocí přístroje Perkin-Elmer DSC6 včetně softwarového vybavení Pyris pro stanovení DSC termogramu, torzních vah s přesností na 0,2 mg, chladiče Minichiller CC a lisovacího zařízení Perkin-Elmer.

Všechny zkoušky jsou dále samostatně popsány a vyhodnoceny v následujících kapitolách.



### 3.2.2 Stanovení hustoty imerzní metodou

K měření jsme použili digitální váhy AND G 300, pomocí které jsme stanovili hmotnost zkušební vzorku položeného na horní misce vahadla vah. Poté jsme vzorek položili na spodní misku vahadla vah, která byla ponořena do imerzní kapaliny (viz. obr. 3.2.2.1), a stanovili jeho hmotnost. Výslednou hustotu zkušební vzorku [kg/m<sup>3</sup>] jsme vypočítali pomocí vzorce 3.2.2.1.



Obr. 3.2.2.1: Kádinka s vahami [16]

$$\rho = \frac{m_{vz} \cdot \rho_{ik}}{m_{vz} - m_{vz,ik}} \cdot 10^3 \quad (3.2.2.1)$$

kde je:

$m_{vz}$  - hmotnost zkušební vzorku na vzduchu [g],

$m_{vz,ik}$  - nekorigovaná hmotnost zkušební vzorku v imerzní kapalině [g],

$\rho_{ik}$  - hustota imerzní kapaliny [kg/m<sup>3</sup>] (=0,79 g/cm<sup>3</sup>).

Tab. 3.2.2.1: Výsledky stanovení hustoty pro materiál PP.

Vzorek číslo	$m_{vz}$ [g]	$m_{vz,ik}$ [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	0,502	0,053	883,25
2	0,459	0,050	886,57
3	0,548	0,059	885,31
4	0,379	0,039	880,61
5	0,343	0,039	891,34
$\bar{x}$			<b>885,42</b>
s			<b>3,58</b>



Tab. 3.2.2.2: Výsledky stanovení hustoty pro materiál PP + 15 % talek.

Vzorek číslo	$m_{vz}$ [g]	$m_{vz.ik}$ [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	0,542	0,110	991,16
2	0,561	0,115	993,70
3	0,439	0,085	990,89
4	0,426	0,088	995,68
5	0,503	0,102	990,95
$\bar{x}$			<b>991,53</b>
s			<b>1,09</b>

Tab. 3.2.2.3: Výsledky stanovení hustoty pro materiál PP + 10 % iM16K.

Vzorek číslo	$m_{vz}$ [g]	$m_{vz.ik}$ [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	0,522	0,048	870,00
2	0,367	0,035	873,28
3	0,588	0,053	868,26
4	0,396	0,038	873,85
5	0,695	0,067	874,28
$\bar{x}$			<b>871,94</b>
s			<b>2,38</b>

Tab. 3.2.2.4: Výsledky stanovení hustoty pro materiál PP + 15 % iM16K.

Vzorek číslo	$m_{vz}$ [g]	$m_{vz.ik}$ [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	0,456	0,037	859,76
2	0,475	0,039	860,67
3	0,517	0,043	861,67
4	0,360	0,030	861,82
5	0,408	0,034	861,82
$\bar{x}$			<b>861,15</b>
s			<b>0,82</b>



Tab. 3.2.2.5: Výsledky stanovení hustoty pro materiál PP + 20 % iM16K.

Vzorek číslo	$m_{vz}$ [g]	$m_{vz.ik}$ [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	0,383	0,027	849,92
2	0,394	0,030	855,11
3	0,521	0,039	853,92
4	0,391	0,029	853,29
5	0,438	0,032	852,27
$\bar{x}$			<b>852,90</b>
s			<b>1,75</b>

Tab. 3.2.2.6: Výsledky stanovení hustoty pro materiál PP + 15 % talek + 10 % iM16K.

Vzorek číslo	$m_{vz}$ [g]	$m_{vz.ik}$ [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	0,507	0,081	940,21
2	0,417	0,067	941,29
3	0,487	0,081	947,61
4	0,555	0,091	944,94
5	0,415	0,065	936,71
$\bar{x}$			<b>942,14</b>
s			<b>3,79</b>

Tab. 3.2.2.7: Výsledky stanovení hustoty pro materiál PP + 15 % talek + 15 % iM16K.

Vzorek číslo	$m_{vz}$ [g]	$m_{vz.ik}$ [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	0,519	0,080	933,96
2	0,496	0,077	935,18
3	0,529	0,083	937,02
4	0,439	0,069	937,32
5	0,553	0,084	931,49
$\bar{x}$			<b>934,99</b>
s			<b>2,14</b>



Tab. 3.2.2.8: Výsledky stanovení hustoty pro materiál PP + 15 % talek + 20 % iM16K.

Vzorek číslo	$m_{vz}$ [g]	$m_{vz.ik}$ [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	0,385	0,047	899,85
2	0,419	0,054	906,88
3	0,482	0,064	910,96
4	0,473	0,064	913,62
5	0,575	0,076	910,32
$\bar{x}$			<b>908,32</b>
s			<b>4,75</b>

Tab. 3.2.2.9: Výsledky stanovení hustoty pro materiál PP + 10 % iM30K.

Vzorek číslo	$m_{vz}$ [g]	$m_{vz.ik}$ [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	0,388	0,035	868,33
2	0,495	0,045	869,00
3	0,397	0,037	871,19
4	0,583	0,055	872,29
5	0,445	0,043	874,50
$\bar{x}$			<b>871,06</b>
s			<b>2,24</b>

Tab. 3.2.2.10: Výsledky stanovení hustoty pro materiál PP + 15 % iM30K.

Vzorek číslo	$m_{vz}$ [g]	$m_{vz.ik}$ [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	0,302	0,025	861,30
2	0,376	0,029	856,02
3	0,370	0,033	867,36
4	0,380	0,032	862,64
5	0,280	0,025	867,45
$\bar{x}$			<b>862,96</b>
s			<b>4,25</b>



Tab. 3.2.2.11: Výsledky stanovení hustoty pro materiál PP + 20 % iM30K.

Vzorek číslo	$m_{vz}$ [g]	$m_{vz.ik}$ [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	0,459	0,035	855,21
2	0,475	0,038	858,70
3	0,480	0,040	,861,82
4	0,406	0,034	862,20
5	0,386	0,029	854,17
$\bar{x}$			<b>858,42</b>
s			<b>3,29</b>

Tab. 3.2.2.12: Výsledky stanovení hustoty pro materiál PP + 15 % talek + 10 % iM30K.

Vzorek číslo	$m_{vz}$ [g]	$m_{vz.ik}$ [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	0,685	0,111	942,77
2	0,414	0,069	948,00
3	0,371	0,061	945,45
4	0,420	0,071	950,72
5	0,436	0,068	935,98
$\bar{x}$			<b>944,85</b>
s			<b>5,05</b>

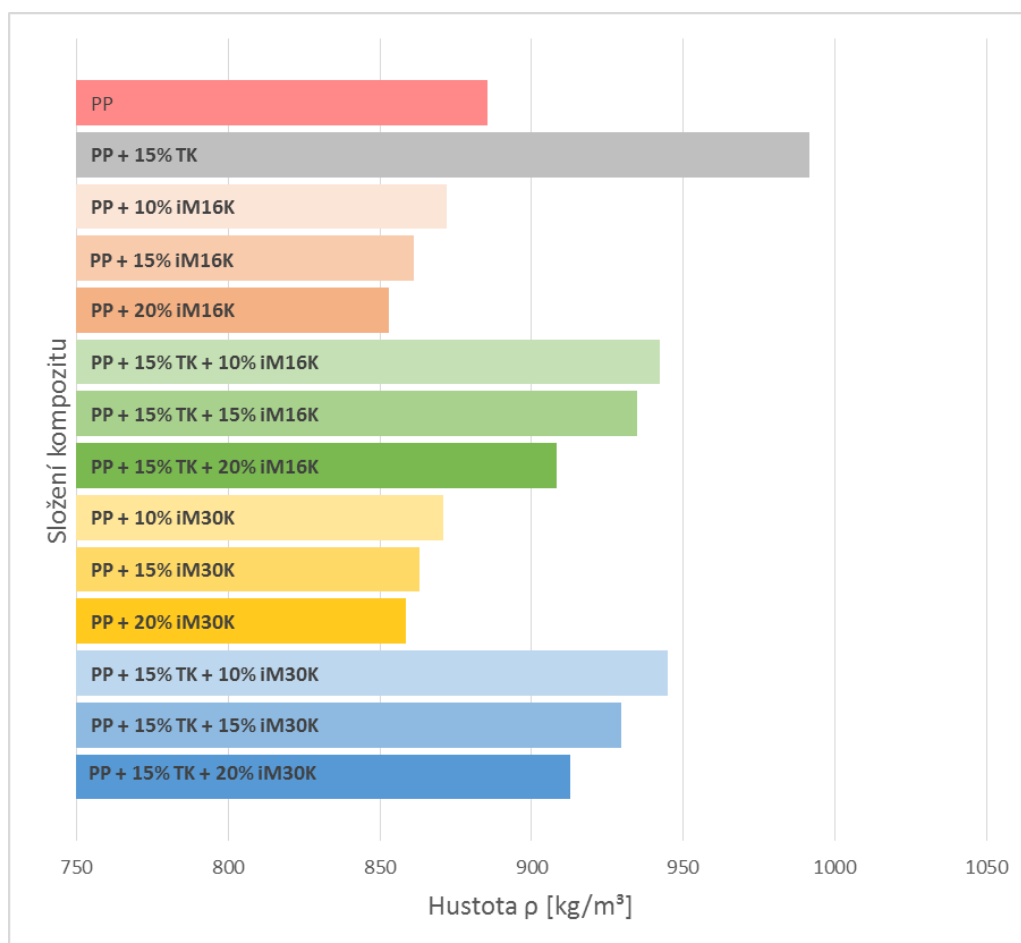
Tab. 3.2.2.13: Výsledky stanovení hustoty pro materiál PP + 15 % talek + 15 % iM30K.

Vzorek číslo	$m_{vz}$ [g]	$m_{vz.ik}$ [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	0,432	0,062	922,38
2	0,429	0,065	931,07
3	0,394	0,060	931,92
4	0,388	0,059	931,67
5	0,428	0,065	931,46
$\bar{x}$			<b>929,70</b>
s			<b>3,67</b>



Tab. 3.2.2.14: Výsledky stanovení hustoty pro materiál PP + 15 % talek + 20 % iM30K.

Vzorek číslo	$m_{vz}$ [g]	$m_{vz.ik}$ [g]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	0,421	0,056	911,21
2	0,471	0,064	914,23
3	0,502	0,068	913,78
4	0,591	0,079	911,90
5	0,559	0,075	912,42
$\bar{x}$			<b>912,70</b>
s			<b>1,14</b>



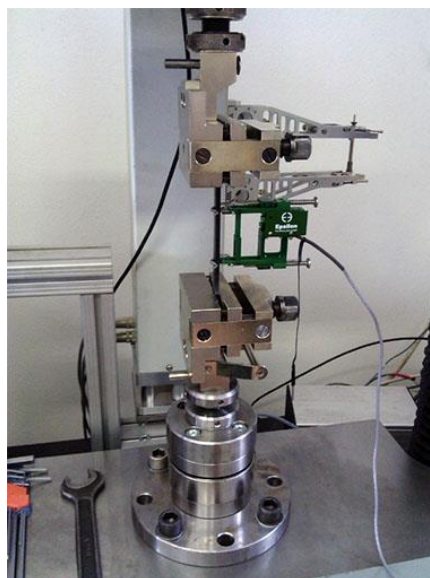
Graf 3.2.2.1: Porovnání hustot jednotlivých vzorků materiálů.

### 3.2.3 Stanovení tahových vlastností

Před samotnou zkouškou jsme nejdříve zkontrolovali, zda rozměry zkušebního tělesa odpovídají normě ČSN EN ISO 527, která předepisuje i podmínky samotné zkoušky [34]. Poté jsme zkušební těleso upnuli do čelistí trhacího stroje Hounsfield H10KT (viz. obr. 3.2.3.1) a na počáteční měřenou část tělesa jsme připevnili průtahoměr pro měření deformace. V řídicím programu jsme nadefinovali materiál zkušebního tělesa, počáteční měřenou délku (80 mm), předzatížení, rychlost k výchozímu předpětí a rychlost zkoušení, kterou jsme podle normy nastavili na hodnotu 50 mm/min. Poté jsme zkušební těleso zatěžovali tahem ve směru své hlavní osy až do jeho porušení a pro každý druh materiálu vzorku jsme určili napětí na mezi pevnosti v tahu  $\sigma_m$  a příslušné poměrné prodloužení  $\varepsilon_m$ . Pro dalších deset vzorků jsme pak na trhacím stroji TIRA test 2300 s průtahoměrem Epsilon (viz. obr. 3.2.3.2) snímali napětí při hodnotě poměrného prodloužení 0,05 % a 0,25 % a pomocí softwaru zaznamenávali modul pružnosti v tahu  $E_m$  [MPa].



Obr. 3.2.3.1: Trhací stroj Hounsfield [35]



Obr. 3.2.3.2: Trhací stroj TIRA test 2300 s průtahoměrem Epsilon [16]



### 1) Výsledky stanovení meze pevnosti v tahu a jejího poměrného prodloužení

Tab. 3.2.3.1: Výsledky na mezi pevnosti v tahu pro materiál PP.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	s
$\sigma_m$ [MPa]	27,2	27,0	26,8	27,1	26,8	26,9	27,2	27,0	27,0	27,1	<b>27,0</b>	<b>0,2</b>
$\epsilon_m$ [%]	6,0	6,0	6,6	6,0	6,0	6,2	6,0	6,0	6,0	6,1	<b>6,1</b>	<b>0,2</b>

Tab. 3.2.3.2: Výsledky na mezi pevnosti v tahu pro materiál PP + 15 % talek.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	s
$\sigma_m$ [MPa]	21,9	21,6	21,8	21,7	21,6	21,7	21,5	21,7	21,6	21,7	<b>21,7</b>	<b>0,1</b>
$\epsilon_m$ [%]	5,3	5,5	5,7	5,9	5,6	4,5	5,2	5,4	5,5	5,7	<b>5,4</b>	<b>0,4</b>

Tab. 3.2.3.3: Výsledky na mezi pevnosti v tahu pro materiál PP + 10 % iM16K.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	s
$\sigma_m$ [MPa]	21,5	22,0	21,9	21,85	21,8	21,8	21,9	21,8	21,6	21,8	<b>21,8</b>	<b>0,1</b>
$\epsilon_m$ [%]	3,0	3,7	3,4	4,2	3,7	4,5	3,5	4,1	3,7	4,2	<b>3,8</b>	<b>0,4</b>

Tab. 3.2.3.4: Výsledky na mezi pevnosti v tahu pro materiál PP + 15 % iM16K.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	s
$\sigma_m$ [MPa]	20,6	19,8	20,1	19,8	20,1	20,1	20,2	20,1	20,1	20,3	<b>20,1</b>	<b>0,2</b>
$\epsilon_m$ [%]	2,59	3,07	1,74	2,88	3,1	2,5	2,6	2,8	2,7	2,9	<b>2,7</b>	<b>0,4</b>





Tab. 3.2.3.5: Výsledky na mezi pevnosti v tahu pro materiál PP + 20 % iM16K.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	s
$\sigma_m$ [MPa]	19,4	19,7	19,9	19,5	19,8	19,4	19,7	19,8	19,9	19,8	<b>19,7</b>	<b>0,2</b>
$\epsilon_m$ [%]	1,8	1,3	2,4	2,1	2,8	1,8	1,3	2,5	2,1	2,7	<b>2,1</b>	<b>0,5</b>

Tab. 3.2.3.6: Výsledky na mezi pevnosti v tahu pro materiál PP + 15 % talek + 10 % iM16K.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	s
$\sigma_m$ [MPa]	19,7	19,6	19,7	19,9	19,9	19,8	19,9	19,7	19,7	19,6	<b>19,7</b>	<b>0,1</b>
$\epsilon_m$ [%]	2,9	3,8	4,1	3,5	4,2	3,8	4,0	3,9	3,8	3,6	<b>3,7</b>	<b>0,3</b>

Tab. 3.2.3.7: Výsledky na mezi pevnosti v tahu pro materiál PP + 15 % talek + 15 % iM16K.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	s
$\sigma_m$ [MPa]	19,9	19,7	19,7	19,5	19,8	19,6	19,7	19,9	19,6	19,8	<b>19,7</b>	<b>0,1</b>
$\epsilon_m$ [%]	3,9	2,5	2,7	3,6	4,2	3,5	3,7	3,6	2,9	3,4	<b>3,4</b>	<b>0,5</b>

Tab. 3.2.3.8: Výsledky na mezi pevnosti v tahu pro materiál PP + 15 % talek + 20 % iM16K.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	s
$\sigma_m$ [MPa]	19,9	20	20,1	20,2	19,7	20,1	19,9	20,0	19,8	20,1	<b>20,0</b>	<b>0,1</b>
$\epsilon_m$ [%]	2,8	2,5	3,2	2,9	3,2	3,3	3,3	2,9	3,0	2,9	<b>3,0</b>	<b>0,3</b>



Tab. 3.2.3.9: Výsledky na mezi pevnosti v tahu pro materiál PP + 10 % iM30K.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	s
$\sigma_m$ [MPa]	20,9	20,8	21,3	21,2	21,5	20,8	20,9	21,1	21,0	21,1	<b>21,0</b>	<b>0,2</b>
$\epsilon_m$ [%]	4,4	4,1	3,8	3,5	4,5	4,3	4,2	4,0	3,6	4,2	<b>4,1</b>	<b>0,3</b>

Tab. 3.2.3.10: Výsledky na mezi pevnosti v tahu pro materiál PP + 15 % iM30K.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	s
$\sigma_m$ [MPa]	19,5	19,7	19,4	19,6	19,4	19,4	19,7	19,4	19,6	19,6	<b>19,5</b>	<b>0,1</b>
$\epsilon_m$ [%]	2,7	2,2	2,2	3,0	2,3	2,7	2,3	2,6	2,4	2,2	<b>2,4</b>	<b>0,2</b>

Tab. 3.2.3.11: Výsledky na mezi pevnosti v tahu pro materiál PP + 20 % iM30K.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	s
$\sigma_m$ [MPa]	17,9	18,5	18,0	18,1	16,8	16,7	17,4	16,9	17,9	18,1	<b>17,6</b>	<b>0,6</b>
$\epsilon_m$ [%]	1,7	1,9	2,0	1,7	1,5	1,1	1,2	1,6	1,5	1,9	<b>1,6</b>	<b>0,3</b>

Tab. 3.2.3.12: Výsledky na mezi pevnosti v tahu pro materiál PP + 15 talek +10 % iM30K.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	s
$\sigma_m$ [MPa]	19,1	18,9	18,7	19,0	18,9	18,9	18,8	18,7	19,1	19,0	<b>18,9</b>	<b>0,1</b>
$\epsilon_m$ [%]	3,4	3,3	2,6	3,5	3,4	3,2	2,9	3,1	3,3	3,2	<b>3,2</b>	<b>0,3</b>

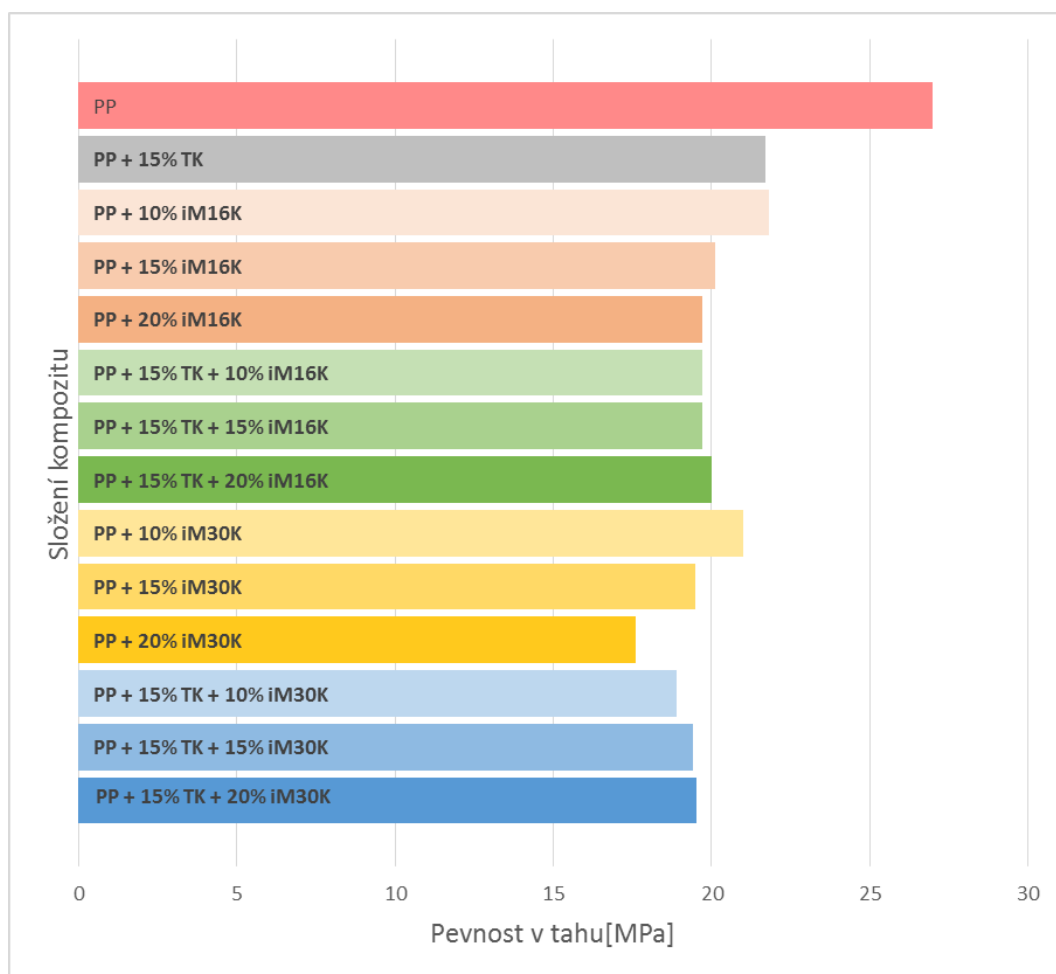


Tab. 3.2.3.13: Výsledky na mezi pevnosti v tahu pro materiál PP + 15 talek +15 % iM30K.

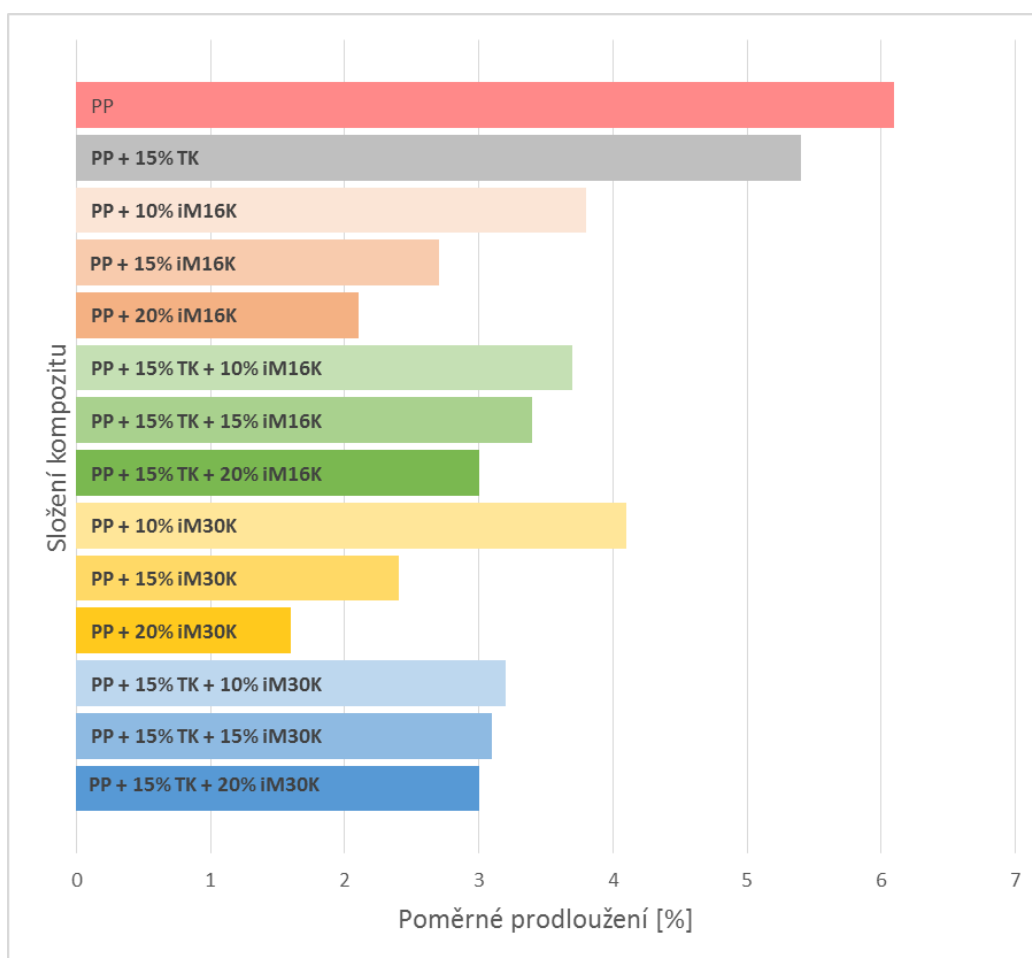
n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	s
$\sigma_m$ [MPa]	19,4	19,3	19,6	19,5	19,7	18,9	19,5	19,2	19,5	19,4	<b>19,4</b>	<b>0,2</b>
$\epsilon_m$ [%]	2,7	3,3	3,2	3,1	3,8	2,5	2,8	3,2	3,3	3,0	<b>3,1</b>	<b>0,3</b>

Tab. 3.2.3.14: Výsledky na mezi pevnosti v tahu pro materiál PP + 15 talek +20 % iM30K.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x}$	s
$\sigma_m$ [MPa]	19,6	19,5	19,6	19,5	19,6	19,5	19,5	19,6	19,5	19,7	<b>19,5</b>	<b>0,1</b>
$\epsilon_m$ [%]	3,7	2,7	2,6	3,5	2,7	3,1	3,5	2,9	2,8	2,8	<b>3,0</b>	<b>0,4</b>



Graf 3.2.3.1: Porovnání pevností v tahu jednotlivých vzorků materiálů.



Graf 3.2.3.2: Porovnání hodnot poměrného prodloužení jednotlivých vzorků materiálů.



## 2) Výsledky stanovení modulu pružnosti v tahu

Tab. 3.2.3.15: Výsledky modulu pružnosti v tahu pro materiál PP.

Vzorek číslo	$E_m$ [MPa]
1	1412,6
2	1366,3
3	1378,7
4	1406,5
5	1392,6
6	1390,7
7	1404,1
8	1396,4
9	1389,8
10	1398,3
$\bar{x}$	<b>1393,9</b>
S	<b>13,3</b>

Tab. 3.2.3.16: Výsledky modulu pružnosti v tahu pro materiál PP + 15 % talek.

Vzorek číslo	$E_m$ [MPa]
1	1654,8
2	1522,2
3	1531,7
4	1632,1
5	1597,0
6	1643,0
7	1578,4
8	1515,3
9	1624,6
10	1633,3
$\bar{x}$	<b>1593,2</b>
S	<b>50,5</b>



Tab. 3.2.3.17: Výsledky modulu pružnosti v tahu pro materiál PP + 10 % iM16K.

Vzorek číslo	$E_m$ [MPa]
1	1686,5
2	1660,6
3	1652,6
4	1618,7
5	1636,4
6	1650,1
7	1640,3
8	1648,7
9	1672,3
10	1623,2
$\bar{x}$	<b>1648,9</b>
S	<b>19,8</b>

Tab. 3.2.3.18: Výsledky modulu pružnosti v tahu pro materiál PP + 15 % iM16K.

Vzorek číslo	$E_m$ [MPa]
1	1764,9
2	1787,2
3	1762,4
4	1799,7
5	1789,7
6	1772,7
7	1795,3
8	1769,1
9	1778,6
10	1780,9
$\bar{x}$	<b>1780,1</b>
S	<b>12,2</b>



Tab. 3.2.3.19: Výsledky modulu pružnosti v tahu pro materiál PP + 20 % iM16K.

Vzorek číslo	$E_m$ [MPa]
1	1925,8
2	1936,5
3	1916,1
4	1904,4
5	1912,1
6	1920,7
7	1912,3
8	1929,5
9	1918,8
10	1911,4
$\bar{x}$	<b>1918,8</b>
S	<b>9,1</b>

Tab. 3.2.3.20: Výsledky modulu pružnosti v tahu pro materiál PP + 15 % talek + 10 % iM16K.

Vzorek číslo	$E_m$ [MPa]
1	1750,1
2	1837,3
3	1767,9
4	1732,1
5	1824,3
6	1777,5
7	1792,2
8	1811,4
9	1805,6
10	1793,3
$\bar{x}$	<b>1788,7</b>
S	<b>32,8</b>



Tab. 3.2.3.21: Výsledky modulu pružnosti v tahu pro materiál PP + 15 % talek + 15 % iM16K.

Vzorek číslo	$E_m$ [MPa]
1	1750,1
2	1837,3
3	1767,9
4	1732,1
5	1824,3
6	1777,5
7	1792,2
8	1811,4
9	1805,6
10	1793,3
$\bar{x}$	<b>1801,6</b>
S	<b>36,6</b>

Tab. 3.2.3.22: Výsledky modulu pružnosti v tahu pro materiál PP + 15 % talek + 20 % iM16K.

Vzorek číslo	$E_m$ [MPa]
1	1880,6
2	1683,2
3	1860,2
4	1886,6
5	1912,2
6	1905,5
7	1880,9
8	1913,3
9	1814,7
10	1899,1
$\bar{x}$	<b>1863,6</b>
S	<b>66,3</b>





Tab. 3.2.3.23: Výsledky modulu pružnosti v tahu pro materiál PP + 10 % iM30K.

Vzorek číslo	$E_m$ [MPa]
1	1683,4
2	1695,4
3	1648,6
4	1672,8
5	1618,2
6	1660,4
7	1674,8
8	1656,1
9	1617,7
10	1681,2
$\bar{x}$	<b>1660,9</b>
S	<b>25,1</b>

Tab. 3.2.3.24: Výsledky modulu pružnosti v tahu pro materiál PP + 15 % iM30K.

Vzorek číslo	$E_m$ [MPa]
1	1829,0
2	1825,6
3	1761,0
4	1807,9
5	1845,7
6	1813,3
7	1805,1
8	1798,7
9	1821,1
10	1815,9
$\bar{x}$	<b>1812,3</b>
S	<b>21,3</b>



Tab. 3.2.3.25: Výsledky modulu pružnosti v tahu pro materiál PP + 20 % iM30K.

Vzorek číslo	$E_m$ [MPa]
1	2025,1
2	1991,0
3	1981,2
4	199,3
5	2000,6
6	2001,1
7	2013,0
8	1997,7
9	1997,4
10	2010,2
$\bar{x}$	<b>2001,8</b>
S	<b>11,5</b>

Tab. 3.2.3.26: Výsledky modulu pružnosti v tahu pro materiál PP + 15 % talek + 10 % iM30K.

Vzorek číslo	$E_m$ [MPa]
1	1791,7
2	1790,4
3	1704,4
4	1802,6
5	1757,2
6	1770,5
7	1805,5
8	1797,6
9	1810,3
10	1694,4
$\bar{x}$	<b>1772,5</b>
S	<b>39,6</b>

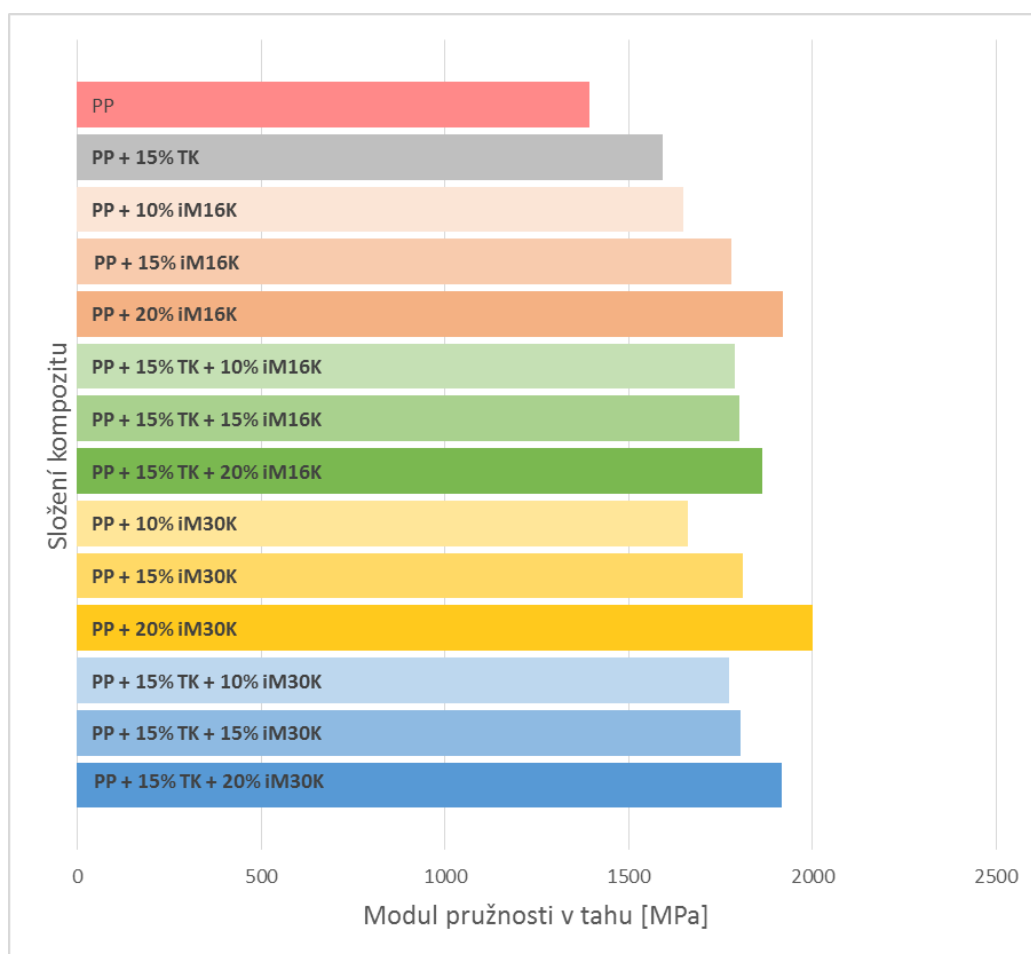


Tab. 3.2.3.27: Výsledky modulu pružnosti v tahu pro materiál PP + 15 % talek + 15 % iM30K.

Vzorek číslo	$E_m$ [MPa]
1	1808,0
2	1834,6
3	1803,3
4	1798,7
5	1801,4
6	1810,2
7	1787,5
8	1790,0
9	1802,2
10	1803,0
$\bar{x}$	<b>1803,9</b>
S	<b>12,24</b>

Tab. 3.2.3.28: Výsledky modulu pružnosti v tahu pro materiál PP + 15 % talek + 20 % iM30K.

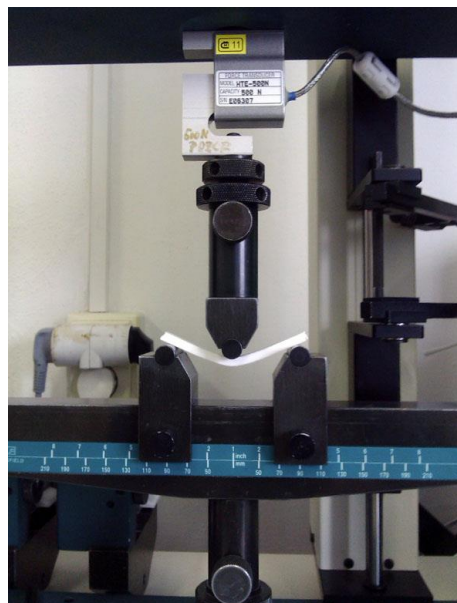
Vzorek číslo	$E_m$ [MPa]
1	1896,5
2	1936,8
3	1917,5
4	1971,4
5	1830,4
6	1897,7
7	1921,5
8	1918,7
9	1965,6
10	1894,9
$\bar{x}$	<b>1917,0</b>
S	<b>39,7</b>



Graf 3.2.3.3: Porovnání modulů pružnosti v tahu jednotlivých vzorků materiálů.

### 3.2.4 Stanovení ohybových vlastností

Před zkouškou jsme opět zkontrolovali, zda rozměry zkušebního tělesa odpovídají příslušné normě (ČSN EN ISO 178) [36]. Následně jsme těleso umístili symetricky na dvě podpory, které jsou od sebe vzdálené ve vzdálenosti  $L$ , která odpovídá vztahu  $L = (16 \pm 1) \times h$ , kde  $h$  je tloušťka zkušebního tělesa. Po definování materiálu a rozměrů vzorku v programu QMAT, jsme těleso prohýbali trnem působícím uprostřed rozpětí podpěr konstantní rychlostí 2 mm/min (viz. obr.



Obr. 3.2.4.1: Trn zatěžující zkušební těleso [16]

3.2.4.1). Pro každý materiál vzorku jsme stanovili pevnost v ohybu, průhyb na mezi pevnosti v ohybu a napětí při hodnotě poměrného prodloužení 0,05 % a 0,25 % pro výpočet modulu pružnosti v ohybu  $E_f$  [MPa] vztahem 3.2.4.1.

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad (3.2.4.1)$$

kde je:

$\sigma_{f1}$  - napětí naměřené při hodnotě poměrného prodloužení 0,05 % [MPa],

$\sigma_{f2}$  - napětí naměřené při hodnotě poměrného prodloužení 0,25 % [MPa],

$\varepsilon_{f1}$  - ohybová deformace 0,05 %,

$\varepsilon_{f2}$  - ohybová deformace 0,25 %.



Tab. 3.2.4.1: Výsledky ohybové zkoušky pro materiál PP.

n	$\sigma_f$ [MPa]	$\epsilon_f$ [%]	$\sigma_{f1}$ [MPa]	$\sigma_{f2}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	35,5	6,42	1,215	3,825	1305,0
2	35,3	6,31	1,215	3,690	1237,5
3	35,1	6,48	1,170	3,645	1237,5
4	35,4	6,48	1,215	3,780	1282,5
5	35,3	6,47	1,215	3,780	1282,5
$\bar{x}$	<b>35,3</b>	<b>6,43</b>			<b>1269,0</b>
s	<b>0,1</b>	<b>0,06</b>			<b>27,0</b>

Tab. 3.2.4.2: Výsledky ohybové zkoušky pro materiál PP + 15 % talek.

n	$\sigma_f$ [MPa]	$\epsilon_f$ [%]	$\sigma_{f1}$ [MPa]	$\sigma_{f2}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	29,4	5,79	1,380	4,530	1575,0
2	30,7	5,63	1,440	4,725	1642,5
3	30,6	5,79	1,440	4,770	1665,0
4	30,5	5,71	1,395	4,500	1552,5
5	29,5	5,74	1,380	4,530	1575,0
$\bar{x}$	<b>30,1</b>	<b>5,73</b>			<b>1602,0</b>
s	<b>0,6</b>	<b>0,06</b>			<b>43,6</b>

Tab. 3.2.4.3: Výsledky ohybové zkoušky pro materiál PP + 10 % iM16K.

n	$\sigma_f$ [MPa]	$\epsilon_f$ [%]	$\sigma_{f1}$ [MPa]	$\sigma_{f2}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	34,7	5,11	1,395	4,680	1642,5
2	34,4	5,27	1,395	4,545	1575,0
3	35,0	5,10	1,440	4,680	1620,0
4	34,7	5,22	1,395	4,725	1665,0
5	35,1	5,25	1,395	4,545	1575,0
$\bar{x}$	<b>34,9</b>	<b>5,19</b>			<b>1615,5</b>
s	<b>0,2</b>	<b>0,07</b>			<b>35,0</b>



Tab. 3.2.4.4: Výsledky ohybové zkoušky pro materiál PP + 15 % iM16K.

n	$\sigma_f$ [MPa]	$\epsilon_f$ [%]	$\sigma_{f1}$ [MPa]	$\sigma_{f2}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	33,8	4,31	1,440	4,950	1755,0
2	33,8	4,28	1,485	4,950	1732,5
3	32,5	4,34	1,440	4,905	1732,5
4	33,8	4,46	1,440	4,770	1665,0
5	33,5	4,26	1,440	4,950	1755,0
$\bar{x}$	<b>33,5</b>	<b>4,33</b>			<b>1728,0</b>
s	<b>0,5</b>	<b>0,07</b>			<b>33,1</b>

Tab. 3.2.4.5: Výsledky ohybové zkoušky pro materiál PP + 20 % iM16K.

n	$\sigma_f$ [MPa]	$\epsilon_f$ [%]	$\sigma_{f1}$ [MPa]	$\sigma_{f2}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	32,8	3,36	1,530	5,220	1845,0
2	32,4	3,35	1,530	5,310	1890,0
3	33,1	3,33	1,575	5,450	1937,5
4	32,3	3,35	1,530	5,220	1845,0
5	32,5	3,36	1,530	5,400	1935,0
$\bar{x}$	<b>32,6</b>	<b>3,35</b>			<b>1890,5</b>
s	<b>0,3</b>	<b>0,01</b>			<b>40,8</b>

Tab. 3.2.4.6: Výsledky ohybové zkoušky pro materiál PP + 15 % talek + 10 % iM16K.

n	$\sigma_f$ [MPa]	$\epsilon_f$ [%]	$\sigma_{f1}$ [MPa]	$\sigma_{f2}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	30,2	5,42	1,440	4,680	1620,0
2	30,4	5,20	1,440	4,770	1665,0
3	30,6	5,26	1,440	4,805	1682,5
4	30,3	5,49	1,440	4,770	1665,0
5	30,2	5,27	1,440	4,770	1665,0
$\bar{x}$	<b>30,3</b>	<b>5,33</b>			<b>1659,5</b>
s	<b>0,2</b>	<b>0,11</b>			<b>20,9</b>



Tab. 3.2.4.7: Výsledky ohybové zkoušky pro materiál PP + 15 % talek + 15 % iM16K.

n	$\sigma_f$ [MPa]	$\epsilon_f$ [%]	$\sigma_{f1}$ [MPa]	$\sigma_{f2}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	31,5	5,05	1,495	5,045	1775,0
2	31,8	5,00	1,485	5,040	1777,5
3	31,9	5,11	1,485	4,950	1732,5
4	31,4	5,16	1,470	5,010	1770,0
5	31,5	5,21	1,440	4,860	1710,0
$\bar{x}$	<b>31,6</b>	<b>5,11</b>			<b>1753,0</b>
s	<b>0,2</b>	<b>0,07</b>			<b>27,0</b>

Tab. 3.2.4.8: Výsledky ohybové zkoušky pro materiál PP + 15 % talek + 20 % iM16K.

n	$\sigma_f$ [MPa]	$\epsilon_f$ [%]	$\sigma_{f1}$ [MPa]	$\sigma_{f2}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	31,9	4,98	1,530	5,130	1800,0
2	31,9	5,00	1,485	4,995	1755,0
3	32,1	5,01	1,485	5,090	1802,5
4	31,7	4,96	1,485	4,950	1732,5
5	31,9	5,02	1,485	5,090	1802,5
$\bar{x}$	<b>31,9</b>	<b>4,99</b>			<b>1778,5</b>
s	<b>0,1</b>	<b>0,02</b>			<b>29,3</b>

Tab. 3.2.4.9: Výsledky ohybové zkoušky pro materiál PP + 10 % iM30K.

n	$\sigma_f$ [MPa]	$\epsilon_f$ [%]	$\sigma_{f1}$ [MPa]	$\sigma_{f2}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	34,2	5,04	1,395	4,680	1642,5
2	34,2	5,08	1,395	4,680	1642,5
3	33,2	5,24	1,350	4,500	1575,0
4	34,5	5,05	1,440	4,725	1642,5
5	34,0	5,19	1,260	4,410	1575,0
$\bar{x}$	<b>34,0</b>	<b>5,12</b>			<b>1615,5</b>
s	<b>0,5</b>	<b>0,08</b>			<b>33,1</b>





Tab. 3.2.4.10: Výsledky ohybové zkoušky pro materiál PP + 15 % iM30K.

n	$\sigma_f$ [MPa]	$\epsilon_f$ [%]	$\sigma_{f1}$ [MPa]	$\sigma_{f2}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	33,2	4,56	1,440	4,905	1732,5
2	33,6	4,64	1,395	4,860	1732,5
3	32,8	4,51	1,440	4,995	177,5
4	33,4	4,52	1,485	4,950	1732,5
5	33,6	4,28	1,485	5,005	1760,0
$\bar{x}$	<b>33,3</b>	<b>4,50</b>			<b>1747,0</b>
s	<b>0,3</b>	<b>0,12</b>			<b>18,6</b>

Tab. 3.2.4.11: Výsledky ohybové zkoušky pro materiál PP + 20 % iM30K.

n	$\sigma_f$ [MPa]	$\epsilon_f$ [%]	$\sigma_{f1}$ [MPa]	$\sigma_{f2}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	31,4	3,46	1,575	5,400	1912,5
2	31,1	3,80	1,575	5,450	1937,5
3	31,5	3,57	1,575	5,400	1912,5
4	31,7	3,47	1,575	5,490	1957,5
5	32,0	3,41	1,485	5,400	1957,5
$\bar{x}$	<b>31,5</b>	<b>3,54</b>			<b>1935,5</b>
s	<b>0,3</b>	<b>0,14</b>			<b>20,1</b>

Tab. 3.2.4.12: Výsledky ohybové zkoušky pro materiál PP + 15 % talek + 10 % iM30K.

n	$\sigma_f$ [MPa]	$\epsilon_f$ [%]	$\sigma_{f1}$ [MPa]	$\sigma_{f2}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	30,0	5,08	1,440	4,800	1680,0
2	32,9	5,40	1,410	4,560	1575,0
3	29,9	5,05	1,440	4,800	1680,0
4	30,0	5,19	1,440	4,860	1710,0
5	30,1	5,11	1,440	4,815	1687,5
$\bar{x}$	<b>30,0</b>	<b>5,17</b>			<b>1666,5</b>
s	<b>0,1</b>	<b>0,13</b>			<b>47,1</b>

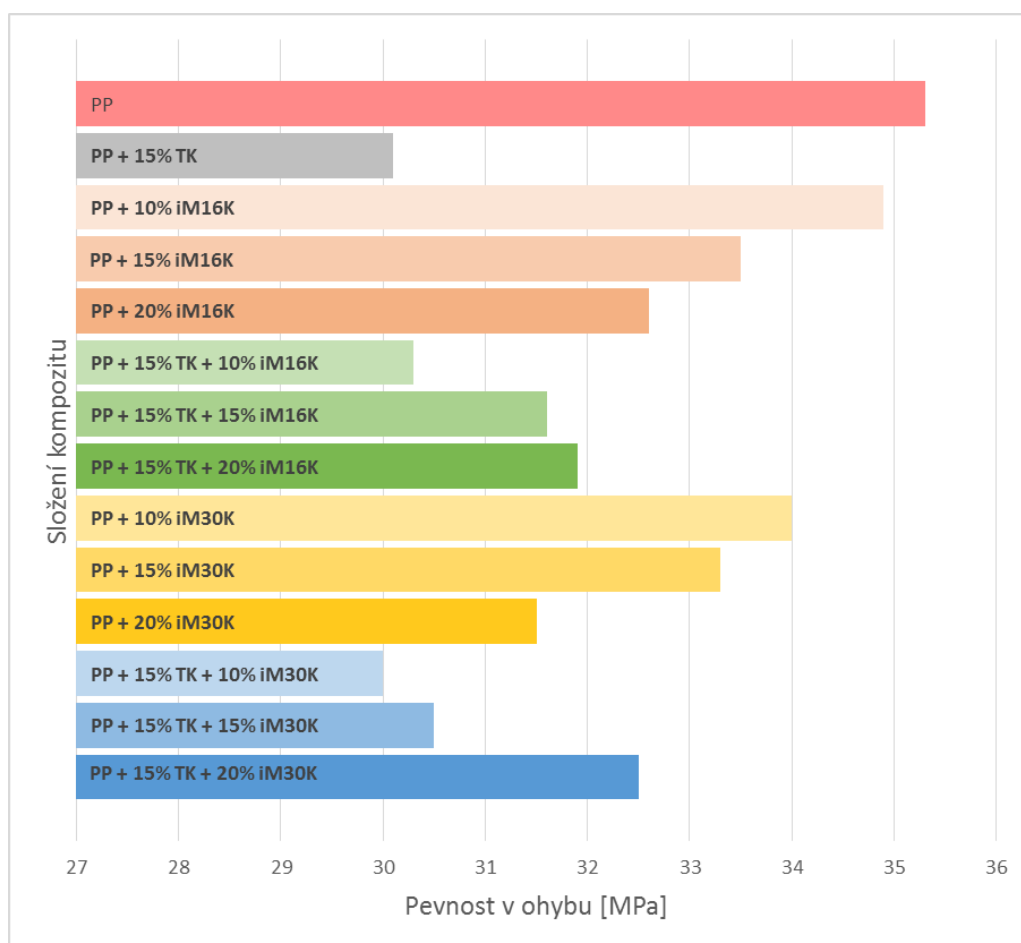


Tab. 3.2.4.13: Výsledky ohybové zkoušky pro materiál PP + 15 % talek + 15 % iM30K.

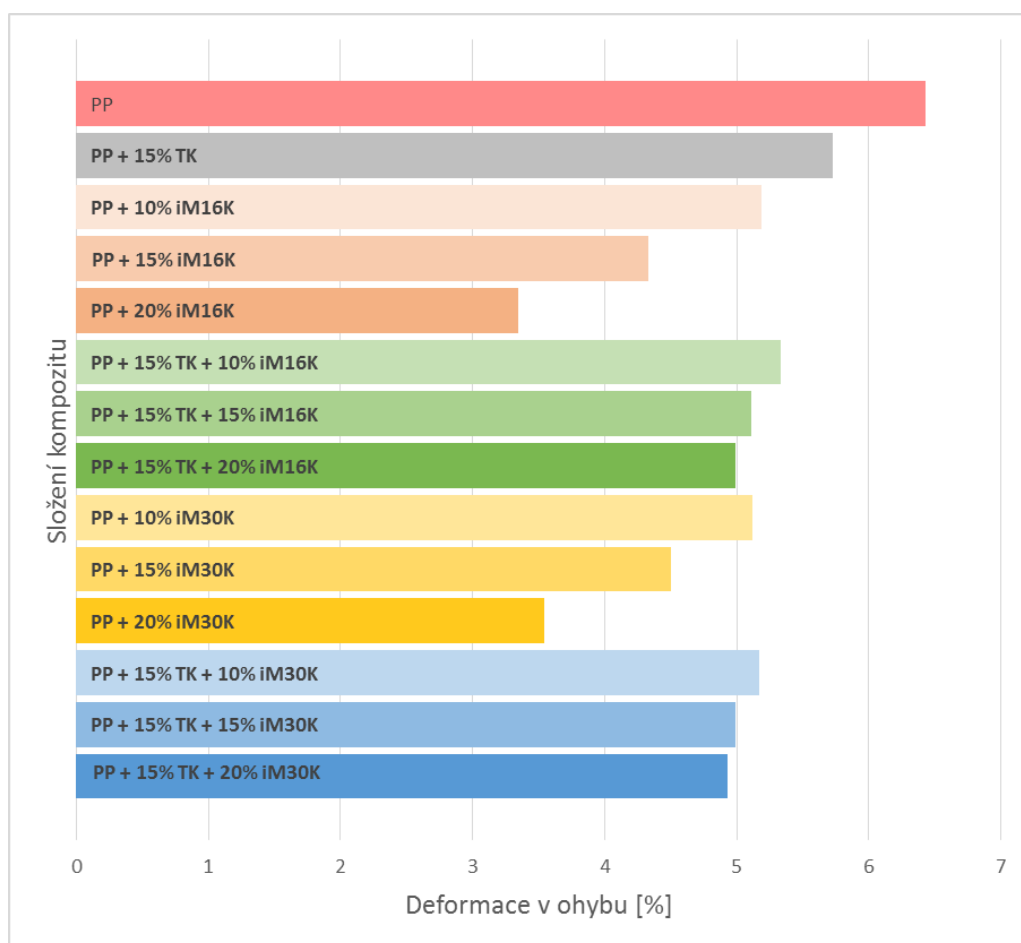
n	$\sigma_f$ [MPa]	$\varepsilon_f$ [%]	$\sigma_{f1}$ [MPa]	$\sigma_{f2}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	30,5	5,11	1,440	4,970	1765,0
2	30,5	4,91	1,485	4,950	1732,5
3	30,6	5,05	1,440	4,950	1755,0
4	30,7	4,97	1,440	4,905	1732,5
5	30,1	4,89	1,440	4,950	1755,0
$\bar{x}$	<b>30,5</b>	<b>4,99</b>			<b>1748,0</b>
s	<b>0,2</b>	<b>0,08</b>			<b>13,2</b>

Tab. 3.2.4.14: Výsledky ohybové zkoušky pro materiál PP + 15 % talek + 20 % iM30K.

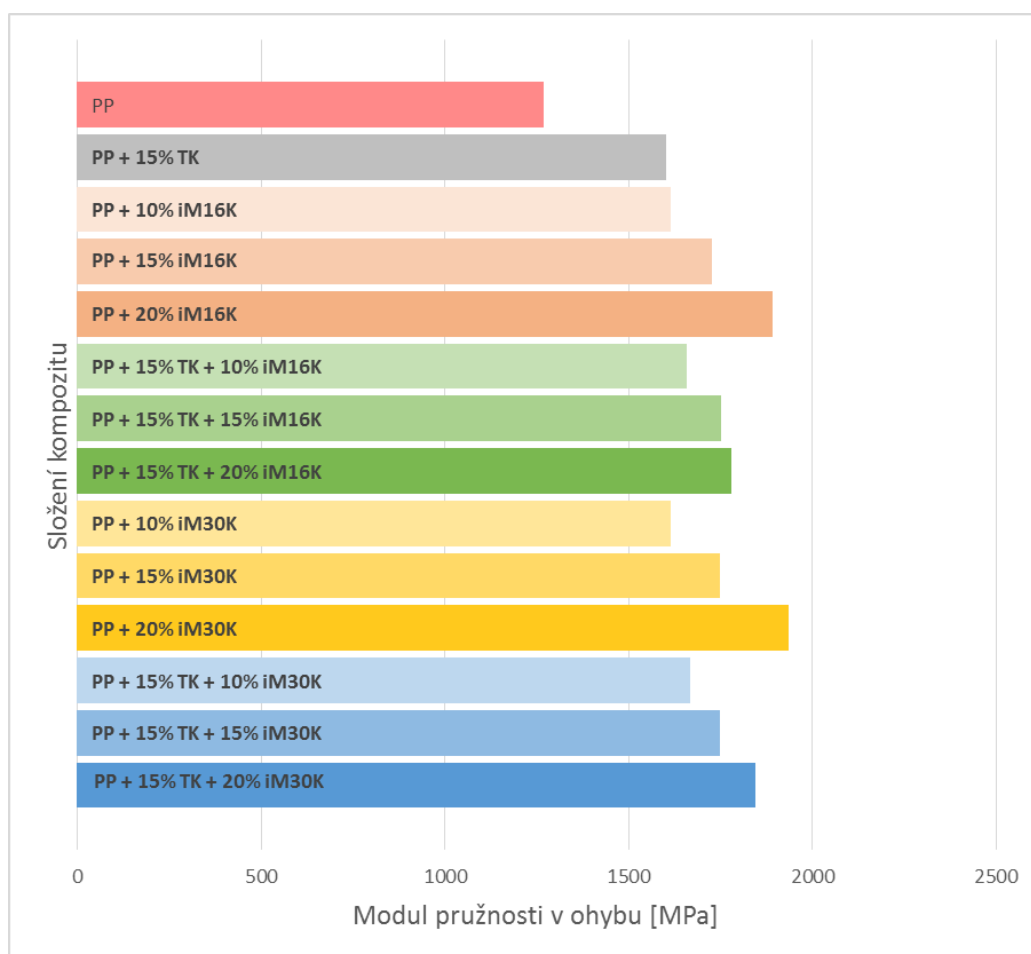
n	$\sigma_f$ [MPa]	$\varepsilon_f$ [%]	$\sigma_{f1}$ [MPa]	$\sigma_{f2}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	32,7	4,98	1,530	5,220	1845,0
2	32,3	4,94	1,530	5,130	1800,0
3	32,3	4,85	1,530	5,270	1870,0
4	32,4	4,90	1,530	5,220	1845,0
5	32,7	4,97	1,530	5,250	1860,0
$\bar{x}$	<b>32,5</b>	<b>4,93</b>			<b>1844,0</b>
s	<b>0,2</b>	<b>0,05</b>			<b>24,0</b>



Graf 3.2.4.1: Porovnání mezí pevnosti v ohybu jednotlivých vzorků materiálů.



Graf 3.2.4.2: Porovnání deformací v ohybu jednotlivých vzorků materiálů.



Graf 3.2.4.3: Porovnání modulů pružnosti v ohybu jednotlivých vzorků materiálů.

### 3.2.5 Stanovení rázové a vrubové houževnatosti

Z důvodu velmi odlišných houževnatostí plněných a neplněných materiálů, jsme byli nuceni provést zkoušku houževnatosti jak rázovou tak vrubovou. Tyto zkoušky byly stanoveny metodou Charpy (viz. obr. 3.2.5.1), která je definována normou ČSN EN ISO 179-1 [38]. Před zahájením zkoušky bylo nutné vzorky pro stanovení vrubové houževnatosti opatřit vrubem podle ISO 2818 [39], což bylo provedeno



Obr. 3.2.5.1: Charpyho kladivo [37]

mechanickou vrubovačkou CEAST. Vrub byl zvolen typu A. Následovala volba rázového kladiva Charpy s vhodnou potenciální energií pro jednotlivé materiály, tak aby spotřebovaná energie nutná k přeražení zkušebního tělesa ležela v rozmezí 10-80 % nominální energie kladiva a energie kladiva ztracené vlivem mechanického tření a odporu vzduchu. Poté jsme už zkušební těleso umístili vodorovně na dvě podpěry a rázem kladiva došlo k přeražení tělesa. U zkušebních vzorků pro vrubovou houževnatost byl ráz proveden na stranu protilehlou k vrubu. Výslednou rázovou houževnatost  $a_{cU}$  [kJ/m<sup>2</sup>] jsme pak počítali podle vztahu 3.2.5.1 a vrubovou houževnatost  $a_{cA}$  [kJ/m<sup>2</sup>] podle vztahu 3.2.5.2. Dále jsme ještě hodnotili druh porušení tělíska: C – úplné přeražení, H – kloubové přeražení, N – nepřeraženo. Označením závorkou (C), (H), (N) je uveden typ přeražení, ke kterému došlo ve většině případů.

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \cdot 10^3 \quad (3.2.5.1)$$

$$a_{cA} = \frac{E_c}{h \cdot b_A} \cdot 10^3 \quad (3.2.5.2)$$



kde je:

$E_c$  - energie potřebná k přeražení zkušebního tělesa [J],

$h$  - tloušťka zkušebního tělesa [mm] (=4 mm),

$b$  - šířka zkušebního tělesa bez vrubu [mm] (=10 mm).

$b_A$  - šířka zkušebního tělesa s vrubem [mm] (=8 mm).

### 1) Výsledky rázové houževnatosti

Tab. 3.2.5.1: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro materiál PP.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	4,978	124,45	N
2	4,967	124,18	N
3	4,967	124,18	N
4	4,754	118,85	C
5	4,988	124,70	N
6	4,989	124,73	N
7	4,989	124,73	N
8	4,970	124,70	N
9	4,925	123,13	N
10	4,971	124,28	N
$\bar{x}$		<b>123,79</b>	(N)
$s$		<b>1,71</b>	



Tab. 3.2.5.2: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro materiál PP + 15 % talek.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	4,962	124,05	N
2	4,927	123,18	N
3	4,927	123,18	N
4	4,985	124,63	N
5	4,900	123,05	N
6	4,927	123,18	N
7	4,975	124,38	N
8	4,297	123,18	N
9	4,955	123,89	N
10	4,963	124,08	N
$\bar{x}$		<b>123,68</b>	(N)
s		<b>0,56</b>	

Tab. 3.2.5.3: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro materiál PP + 10 % iM16K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	1,199	29,98	C
2	1,315	32,88	C
3	1,271	31,78	C
4	1,311	32,28	C
5	1,304	32,60	C
6	1,362	34,05	C
7	1,369	34,23	C
8	1,312	32,28	C
9	1,302	32,55	C
10	1,295	32,38	C
$\bar{x}$		<b>32,50</b>	(C)
s		<b>1,12</b>	





Tab. 3.2.5.4: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro materiál PP + 15 % iM16K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cu}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	0,811	20,73	C
2	0,890	22,25	C
3	0,821	20,94	C
4	0,908	22,70	C
5	0,854	21,35	C
6	0,870	21,75	C
7	0,902	22,55	C
8	0,863	21,58	C
9	0,818	20,45	C
10	0,815	20,38	C
$\bar{x}$		<b>21,47</b>	(C)
$s$		<b>0,80</b>	

Tab. 3.2.5.5: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro materiál PP + 20 % iM16K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cu}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	0,601	15,03	C
2	0,683	17,08	C
3	0,565	14,13	C
4	0,568	14,20	C
5	0,587	14,68	C
6	0,645	16,13	C
7	0,621	15,53	C
8	0,507	12,68	C
9	0,605	15,13	C
10	0,582	14,55	C
$\bar{x}$		<b>14,91</b>	(C)
$s$		<b>1,14</b>	



Tab. 3.2.5.6: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro materiál PP + 15 % talek + 10 % iM16K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	4,059	101,48	C
2	4,984	124,60	N
3	4,984	124,60	N
4	4,874	121,85	N
5	4,873	121,83	N
6	3,265	81,63	C
7	4,210	105,25	C
8	4,639	115,98	C
9	4,260	106,50	C
10	4,650	116,25	C
$\bar{x}$		<b>111,99</b>	(C)
s		<b>12,86</b>	

Tab. 3.2.5.7: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro materiál PP + 15 % talek + 15 % iM16K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	4,585	114,63	C
2	3,593	89,93	C
3	4,859	121,48	H
4	4,438	110,95	H
5	3,445	86,125	C
6	3,458	97,13	C
7	3,590	89,11	C
8	3,633	92,32	C
9	3,590	89,75	C
10	4,662	116,50	C
$\bar{x}$		<b>100,79</b>	(C)
s		<b>12,83</b>	



Tab. 3.2.5.8: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro materiál PP + 15 % talek + 20 % iM16K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	4,027	100,68	C
2	3,996	99,90	C
3	3,908	97,70	C
4	4,155	103,88	C
5	4,382	109,55	C
6	3,738	93,45	C
7	3,648	91,20	C
8	3,855	95,45	C
9	3,803	95,08	C
10	3,901	97,53	C
$\bar{x}$		<b>98,44</b>	(C)
s		<b>5,09</b>	

Tab. 3.2.5.9: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro materiál PP + 10 % iM30K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	1,415	35,38	C
2	1,359	33,98	C
3	1,314	32,85	C
4	1,337	33,43	C
5	1,386	34,65	C
6	1,410	35,20	C
7	1,445	36,13	C
8	1,405	35,13	C
9	1,395	24,88	C
10	1,407	35,18	C
$\bar{x}$		<b>33,68</b>	(C)
s		<b>3,08</b>	



Tab. 3.2.5.10: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro materiál PP + 15 % iM30K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	1,285	32,13	C
2	1,083	27,08	C
3	1,016	25,40	C
4	1,265	31,63	C
5	1,066	26,65	C
6	1,270	31,75	C
7	1,189	29,73	C
8	0,950	23,75	C
9	1,112	27,80	C
10	1,054	26,35	C
$\bar{x}$		<b>28,23</b>	(C)
$s$		<b>2,77</b>	

Tab. 3.2.5.11: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro materiál PP + 20 % iM30K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	0,506	13,91	C
2	0,642	16,65	C
3	0,550	14,25	C
4	0,557	13,93	C
5	0,704	17,60	C
6	0,625	15,63	C
7	0,600	15,00	C
8	0,695	17,38	C
9	0,602	15,05	C
10	0,589	14,73	C
$\bar{x}$		<b>15,41</b>	(C)
$s$		<b>1,30</b>	



Tab. 3.2.5.12: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro materiál PP + 15 talek + 10 % iM30K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	3,957	98,93	C
2	3,505	87,63	C
3	3,820	95,50	C
4	3,716	92,90	C
5	3,520	88,00	C
6	3,928	98,20	C
7	3,865	96,63	C
8	3,383	84,58	C
9	3,420	85,50	C
10	3,580	89,50	C
$\bar{x}$		<b>91,74</b>	(C)
s		<b>5,09</b>	

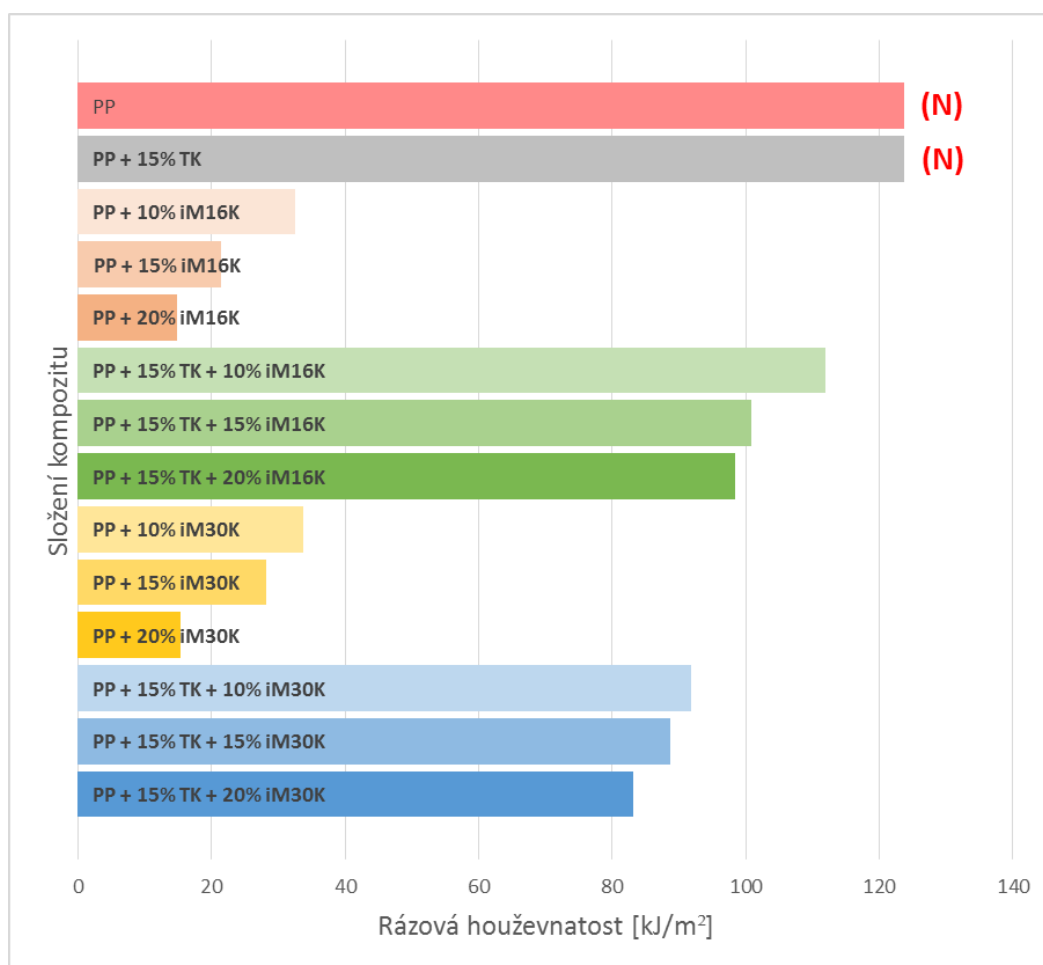
Tab. 3.2.5.13: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro materiál PP + 15 talek + 15 % iM30K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	3,456	86,40	C
2	3,634	90,85	C
3	3,440	86,00	C
4	3,687	92,18	C
5	3,517	87,92	C
6	3,691	92,28	C
7	3,367	84,18	C
8	3,578	89,45	C
9	3,325	83,13	C
10	3,759	93,98	C
$\bar{x}$		<b>88,64</b>	(C)
s		<b>3,50</b>	



Tab. 3.2.5.14: Výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro materiál PP + 15 talek + 20 % iM30K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	3,956	98,90	C
2	3,603	75,08	C
3	3,321	83,03	C
4	3,666	91,65	C
5	3,420	85,5	C
6	3,521	86,12	C
7	2,950	73,75	C
8	3,112	77,22	C
9	3,307	82,68	C
10	3,115	77,88	C
$\bar{x}$		<b>83,18</b>	(C)
s		<b>7,42</b>	



Graf 3.2.5.1: Porovnání výsledků zkoušky rázové houževnatosti jednotlivých vzorků materiálů.

V grafu jsou červeně, písmenem (N), označeny materiály, kde ve většině případů nedošlo k přeražení zkušebního tělíska. Hodnota rázové houževnatosti těchto materiálů tedy bude ještě větší, než je v uvedeném porovnání. U ostatních materiálů došlo k celistvému porušení (C).



## 2) Výsledky vrubové houževnatosti

Tab. 3.2.5.15: Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti pro materiál PP.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	0,281	8,78	C
2	0,252	7,88	C
3	0,254	7,94	C
4	0,274	8,56	C
5	0,265	8,28	C
6	0,229	7,16	C
7	0,247	7,72	C
8	0,234	7,31	C
9	0,250	7,81	C
10	0,248	7,75	C
$\bar{x}$		<b>7,92</b>	(C)
s		<b>0,48</b>	

Tab. 3.2.5.16: Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti pro materiál PP + 15 % talek.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	0,641	20,03	H
2	0,601	18,78	H
3	0,587	18,34	H
4	0,637	19,91	H
5	0,616	19,25	H
6	0,579	18,09	H
7	0,601	18,78	H
8	0,635	19,84	H
9	0,607	18,97	H
10	0,597	18,66	H
$\bar{x}$		<b>19,07</b>	(H)
s		<b>0,64</b>	





Tab. 3.2.5.17: Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti pro materiál PP + 10 % iM16K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	0,089	2,78	C
2	0,090	2,81	C
3	0,087	2,72	C
4	0,092	2,88	C
5	0,103	3,22	C
6	0,101	3,16	C
7	0,116	3,63	C
8	0,098	3,06	C
9	0,095	2,97	C
10	0,101	3,16	C
$\bar{x}$		<b>3,04</b>	(C)
$s$		<b>0,26</b>	

Tab. 3.2.5.18: Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti pro materiál PP + 15 % iM16K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	0,081	2,53	C
2	0,072	2,25	C
3	0,085	2,66	C
4	0,087	2,72	C
5	0,085	2,66	C
6	0,077	2,41	C
7	0,080	2,50	C
8	0,090	2,81	C
9	0,086	2,69	C
10	0,083	2,59	C
$\bar{x}$		<b>2,58</b>	(C)
$s$		<b>0,16</b>	



Tab. 3.2.5.19: Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti pro materiál PP + 20 % iM16K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	0,075	2,34	C
2	0,076	2,38	C
3	0,073	2,28	C
4	0,067	2,09	C
5	0,071	2,22	C
6	0,063	1,97	C
7	0,062	1,94	C
8	0,066	2,06	C
9	0,074	2,31	C
10	0,068	2,13	C
$\bar{x}$		<b>2,17</b>	(C)
$s$		<b>0,15</b>	

Tab. 3.2.5.20: Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti pro materiál PP + 15 % talek + 10 % iM16K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	0,279	8,72	H
2	0,296	9,25	H
3	0,284	8,88	H
4	0,301	9,41	H
5	0,285	8,91	H
6	0,277	8,66	H
7	0,293	9,16	H
8	0,296	9,25	H
9	0,282	8,81	H
10	0,293	9,16	H
$\bar{x}$		<b>9,02</b>	(H)
$s$		<b>0,24</b>	



Tab. 3.2.5.21: Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti pro materiál PP + 15 % talek + 15 % iM16K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	0,255	7,97	H
2	0,262	8,19	H
3	0,247	7,72	H
4	0,245	7,66	H
5	0,251	7,84	H
6	0,239	7,47	H
7	0,242	7,56	H
8	0,241	7,56	H
9	0,252	7,88	H
10	0,249	7,78	H
$\bar{x}$		<b>7,76</b>	(H)
s		<b>0,21</b>	

Tab. 3.2.5.22: Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti pro materiál PP + 15 % talek + 20 % iM16K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	0,209	6,53	C
2	0,189	5,91	C
3	0,196	6,13	C
4	0,199	6,22	C
5	0,186	5,81	C
6	0,207	6,47	C
7	0,201	6,28	C
8	0,204	6,38	C
9	0,197	6,16	C
10	0,202	6,31	C
$\bar{x}$		<b>6,22</b>	(C)
s		<b>0,22</b>	



Tab. 3.2.5.23: Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti pro materiál PP + 10 % iM30K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	0,108	3,38	C
2	0,099	3,09	C
3	0,103	3,22	C
4	0,101	3,16	C
5	0,105	3,28	C
6	0,102	3,19	C
7	0,109	3,41	C
8	0,098	3,06	C
9	0,102	3,19	C
10	0,106	3,31	C
$\bar{x}$		<b>3,23</b>	(C)
s		<b>0,11</b>	

Tab. 3.2.5.24: Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti pro materiál PP + 15 % iM30K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	0,085	2,66	C
2	0,087	2,72	C
3	0,074	2,31	C
4	0,080	2,50	C
5	0,086	2,69	C
6	0,085	2,66	C
7	0,076	2,38	C
8	0,074	2,31	C
9	0,081	2,53	C
10	0,083	2,59	C
$\bar{x}$		<b>2,53</b>	(C)
s		<b>0,15C</b>	



Tab. 3.2.5.25: Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti pro materiál PP + 20 % iM30K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	0,076	2,38	C
2	0,069	2,16	C
3	0,065	2,03	C
4	0,070	2,19	C
5	0,073	2,28	C
6	0,066	2,06	C
7	0,069	2,16	C
8	0,071	2,22	C
9	0,066	2,06	C
10	0,078	2,44	C
$\bar{x}$		<b>2,20</b>	(C)
$s$		<b>0,13</b>	

Tab. 3.2.5.26: Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti pro materiál PP + 15 talek + 10 % iM30K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	0,275	8,59	H
2	0,285	8,91	H
3	0,282	8,81	H
4	0,290	9,06	H
5	0,269	8,41	H
6	0,286	8,94	H
7	0,281	8,78	H
8	0,296	9,25	H
9	0,279	8,72	H
10	0,282	8,81	H
$\bar{x}$		<b>8,83</b>	(H)
$s$		<b>0,22</b>	

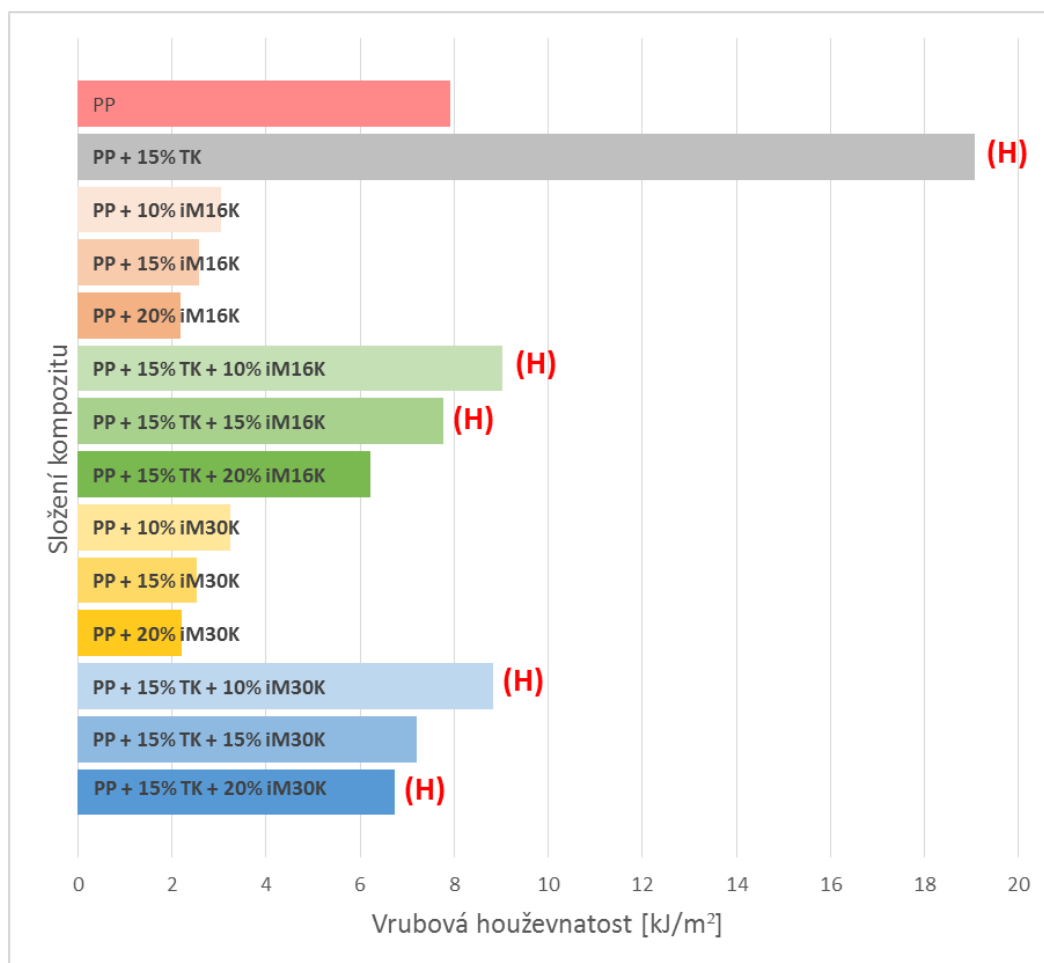


Tab. 3.2.5.27: Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti pro materiál PP + 15 talek + 15 % iM30K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	0,227	7,09	H
2	0,220	6,88	C
3	0,238	7,44	H
4	0,236	7,38	C
5	0,243	7,56	C
6	0,228	7,13	H
7	0,222	6,94	H
8	0,228	7,13	C
9	0,226	7,06	C
10	0,235	7,34	C
$\bar{x}$		<b>7,20</b>	(C)
$s$		<b>0,22</b>	

Tab. 3.2.5.28: Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti pro materiál PP + 15 talek + 20 % iM30K.

Vzorek číslo	$E_c$ [J]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Typ přeražení
1	0,225	7,03	H
2	0,218	6,81	H
3	0,216	6,75	H
4	0,206	6,44	H
5	0,209	6,53	H
6	0,211	6,59	H
7	0,224	7,00	H
8	0,218	6,81	H
9	0,210	6,56	H
10	0,220	6,88	H
$\bar{x}$		<b>6,74</b>	(H)
$s$		<b>0,19</b>	



Graf 3.2.5.2: Srovnání výsledků zkoušky vrubové houževnatosti

V grafu jsou červeným písmenem (H), označeny materiály, kde se ve většině případů zkušební tělísko porušilo kloubovým přeražením. Hodnota skutečné rázové houževnatosti těchto materiálů tedy bude opět větší, než je v uvedeném porovnání. Ostatní materiály byly porušeny celistvým lomem (C).

### 3.2.6 DSC analýza

Posledním experimentem bylo provedení DSC analýzy, neboli diferenciální skenovací kalorimetrie, pro porovnání rychlosti a průběhu krystalizace u plněných a neplněných materiálů. Měření proběhlo u celkem šesti vzorků o navážce  $10 \pm 0,2$  mg a důležité bylo vzorek odebrat ze stejné části každého



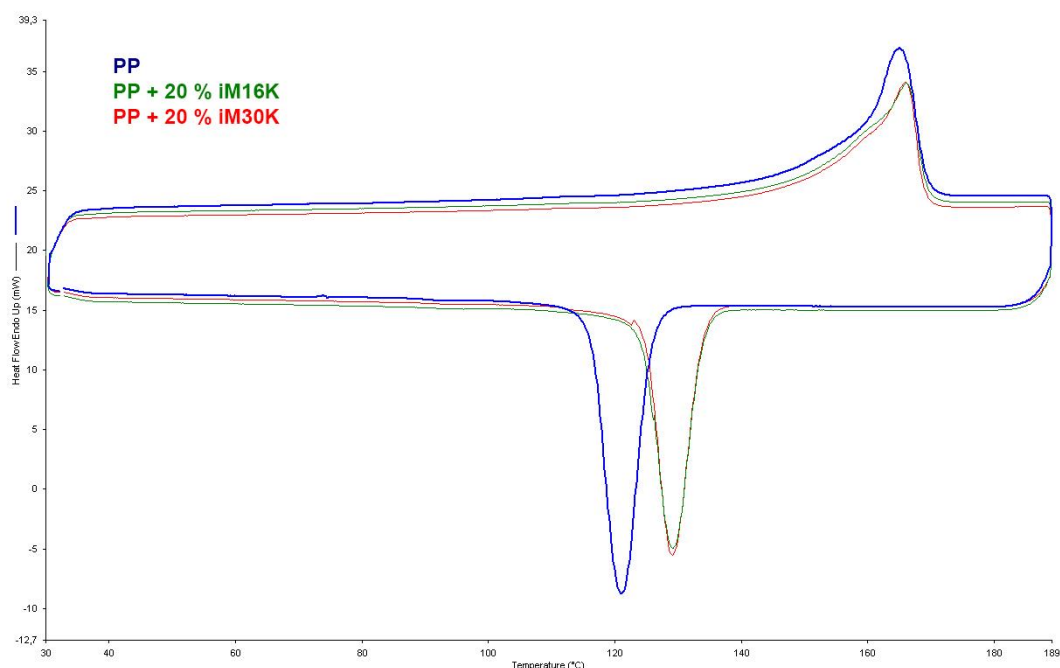
Obr. 3.2.6.1: Diferenciální skenovací kalorimetr Perkin-Elmer. [40]

zkušebního tělíska. Odebraný vzorek byl následně zalisován do hliníkové kapsle a ta byla vložena do měřící hlavy přístroje Perkin-Elmer DSC6 (viz. obr. 3.2.6.1). Na základě registrace rozdílu tepelných příkonů potřebného k udržení nulového teplotního rozdílu pro měřený vzorek a referenční látku v druhé kapsli, byl vytvořen termogram, který jsme následně vyhodnotili a určili teplotu tání  $T_m$ , teplotu krystalizace  $T_c$ , entalpii tání  $\Delta H_m$  a entalpii krystalizace  $\Delta H_c$ . Tyto hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.2.6.1. Pro každý materiál jsme měřili dva teplotní cykly, přičemž v prvním cyklu je termogram ovlivněn vstřikovacím procesem, a jsou zde tedy vidět zpracovatelské vlastnosti materiálu, a v druhém cyklu je termogram už sestaven na základě materiálových vlastností daného vzorku (viz. graf 3.2.6.1 a 3.2.6.2).

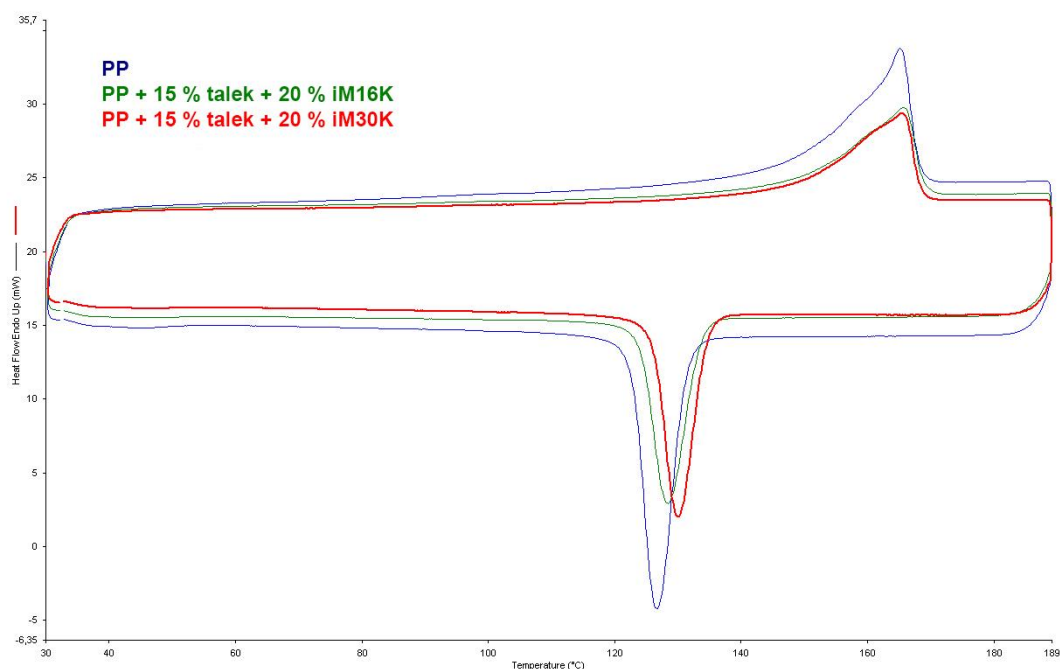
Tab. 3.2.6.1: Naměřené hodnoty pomocí DSC analýzy.

	$T_m$ [°C]		$T_c$ [°C]		$\Delta H_m$ [°C]		$\Delta H_c$ [J/g]	
<b>Cyklus</b>	1	2	1	2	1	2	1	2
<b>PP</b>	165,9	165,1	121,7	121,1	86,6	91,7	-93,5	-90,1
<b>PP + 15 % TK</b>	165,3	165,1	129,8	126,6	56,6	64,0	-66,1	-63,5
<b>PP + 20 % iM16K</b>	166,0	166,1	129,1	129,1	65,2	74,9	-76,7	-78,8
<b>PP + 20 % iM30K</b>	165,8	166,0	129,0	129,1	61,0	75,5	-75,6	-74,6
<b>PP + 15 % TK + 20 % iM16K</b>	165,2	165,7	128,6	128,4	40,7	43,7	-47,2	-46,8
<b>PP + 15 % TK + 20 % iM30K</b>	164,7	165,5	130,1	130,1	37,8	41,7	-46,1	-45,8





Graf 3.2.6.1: Porovnání termogramů 2. cyklu materiálů PP, PP + 20 % iM16K a PP + 20 % iM30K.



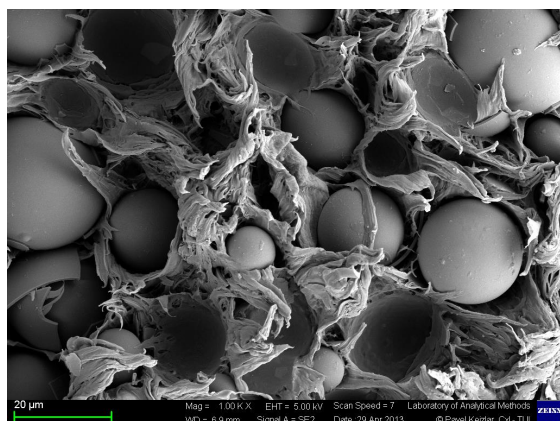
Graf 3.2.6.2: Porovnání termogramů 2. cyklu materiálů PP, PP + 15% talek + 20 % iM16K a PP + 15% talek + 20 % iM30K.

## 4. Diskuse výsledků

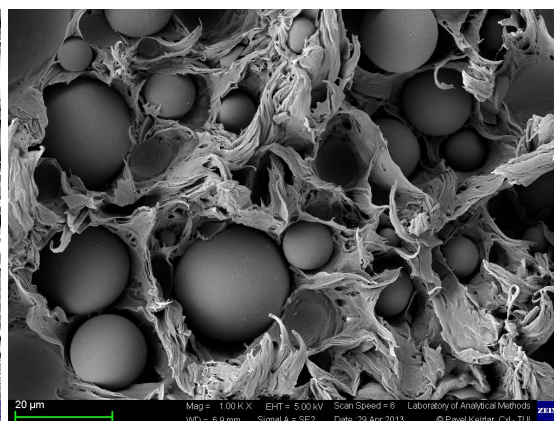
Tato kapitola obsahuje vyhodnocení mikrostruktury kompozitů, vyhodnocení experimentálně naměřených hodnot u zkoušky pro stanovení hustoty, zkoušky tahem, ohybem, zkouškou Charpy a vyhodnocení DSC analýzy.

### 4.1 Zhodnocení mikrostruktury

U několika vzorků vystříknutých zkušebních tělísek byly zkoumány lomové plochy pod elektronovým mikroskopem z důvodu ověření, že duté skleněné kuličky nepodlehly během zpracovatelského procesu destrukci (viz. obr. 4.1.1 a 4.1.2).



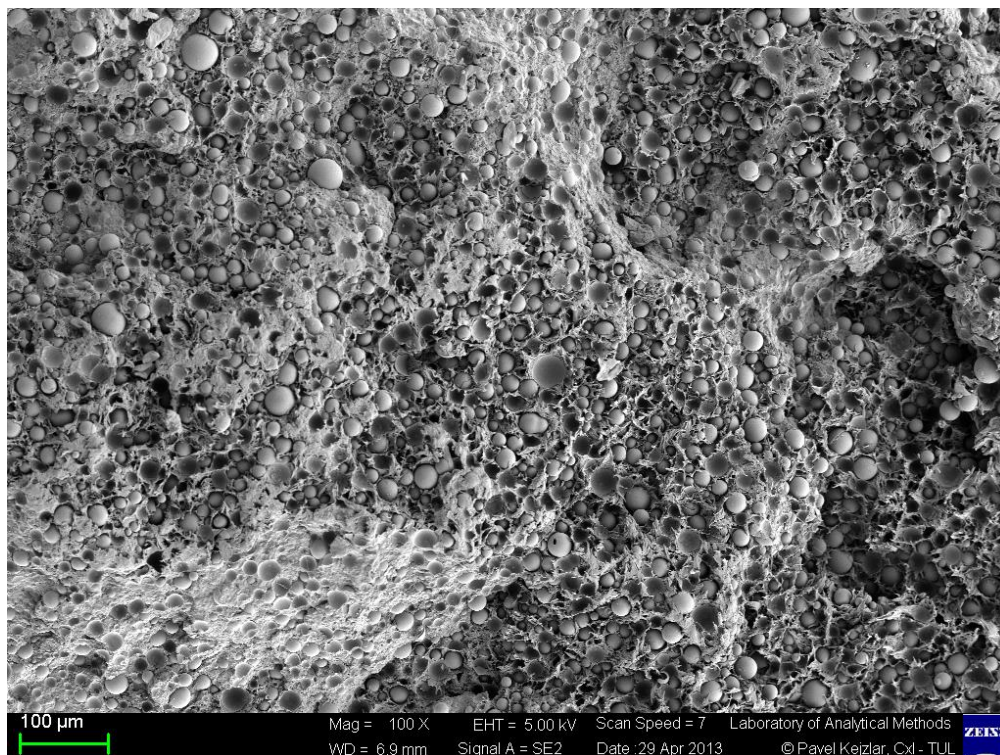
Obr. 4.1.1: Mikroskopický snímek materiálu PP + 20 % iM16K [16]



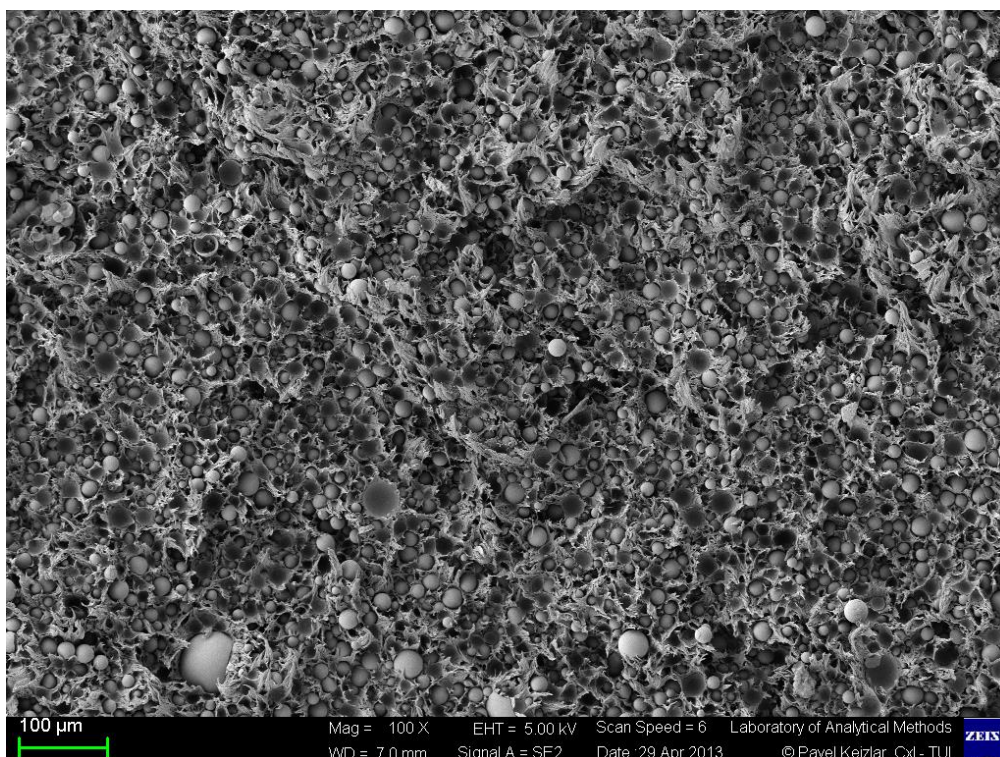
Obr. 4.1.2: Mikroskopický snímek materiálu PP + 20 % iM30K [16]

Ze snímků je vidět celistvost kuliček a také poměrně dobré obklopení kuliček matricí, což je nejspíše důsledkem použití aditiva pro zvýšení adheze mezi těmito prvky. Pokud by byla adheze malá, nebyl by zaručen dobrý přenos napětí z matrice na plnivo. Zkoumané vlastnosti by mohla ovlivnit i špatná dispergace kuliček v matrici, ta je ale podle obr. 4.1.3 a obr. 4.1.4 dobrá.





Obr. 4.1.3: Snímek dispergace kuliček v materiálu PP + 20% iM16K [16]



Obr. 4.1.4: Snímek dispergace kuliček v materiálu PP + 20% iM30K [16]

## 4.2. Stanovení hustoty

Při stanovení hustoty imerzní metodou bylo cílem zjistit hustotu neplněného polypropylenu a polypropylenu plněného talkem pro pozdější cenovou kalkulaci a hustoty materiálu s dutými skleněnými kuličkami pro vyhodnocení úspory hmotnosti.

Ze srovnání naměřených hustot z tabulek 3.2.2.1 - 3.2.2.14 v grafu 3.2.2.1, který je uveden v kapitole 3.2.2, vychází, že kompozitem s největší hustotou je polypropylen s 15 % talku, kde dochází k nárůstu hodnoty hustoty v průměru o 12 %. U směsí s dutými skleněnými kuličkami můžeme prohlásit, že s rostoucím zastoupením kuliček klesá hustota kompozitu. Výrobky, které jsou plněné kuličkami, tedy dosahují stejně výrazné úspory hmotnosti. To prakticky ověřuje tvrzení několika zdrojů, jako je např. [18], [20] a [22] v kapitolách 2.4.2 a 2.5. Z porovnání jednotlivých materiálů pak vychází jako nejlepší směs PP + 20 % iM16K, kde je průměrné snížení hustoty o 4 % vůči neplněnému polypropylenu. U materiálů PP + 15 % talk + 20 % iM16K, PP + 15 % iM30K a PP + 15 % talk + 10 % iM30K je možná chyba v měření, protože pokles hustoty ne zcela odpovídá nepřímé úměře z předchozích materiálů a právě u těchto měření byly zjištěny největší směrodatné odchylky.

## 4.3. Stanovení tahových vlastností

U zkoušky tahem bylo vyhodnocováno napětí na mezi pevnosti  $\sigma_m$ , poměrné prodloužení  $\varepsilon_m$  a modul pružnosti  $E_m$ .

### 4.3.1 Napětí na mezi pevnosti

Z výsledků měření pevnosti v tahu z tabulek 3.2.3.1 až 3.2.3.2 a z grafu porovnání hodnot pro všechny materiály 3.2.3.1 z kapitoly 3.2.4 vyplývá, že v případě neplněného materiálu polypropylen je dosaženo nejvyšších hodnot. Následuje ji materiál PP s 10 % kuliček iM16K a takřka totožných hodnot dosahuje polypropylen plněný talkem. V dalších případech

pak platí, že s rostoucím zastoupením dutých skleněných kuliček klesá mez pevnosti v tahu, což potvrzuje zdroje [17] a [21] v kapitole 2.5. U směsí s talkem není klesající tendence tak markantní jako u směsí polypropylenu pouze s kuličkami.

Za zmínku stojí i odlišná tendence u materiálu plněného pouze kuličkami a materiálu plněného kuličkami a talkem. Zatímco u polypropylenu plněného pouze kuličkami platí přímá úměra s rostoucím zastoupením dutých skleněných kuliček v kompozitu, u polypropylenu s talkem a kuličkami je úměra nepřímá, a tedy pevnost v tahu vzrůstá.

#### 4.3.2 Poměrné prodloužení

Podle srovnání hodnot poměrného prodloužení na mezi pevnosti v tahu z tabulek 3.2.3.1 až 3.2.3.14 grafem 3.2.3.2, jenž je uveden v kapitole 3.2.4, vychází, že nejvíce se deformoval neplněný polypropylen, s příměsí talku kleslo poměrné prodloužení o zhruba 11 %. Opět poměrně s rostoucím obsahem dutých skleněných kuliček klesala i deformace. Nejnižších hodnot vykazoval polypropylen plněný 20 % kuliček typu iM30K, kde pokles poměrného prodloužení činil v průměru 74 %.

#### 4.3.3 Modul pružnosti

Z výsledků experimentálního měření uvedených v tabulkách 3.2.3.15 až 3.2.3.29 v kapitole 3.2.3 bylo zjištěno, že oproti pevnosti v tahu dosahuje neplněný polypropylen naopak nejnižších hodnot modulu pružnosti a u polypropylenu plněného 15 % talku dochází ke zvýšení modulu pružnosti o cca 14 %. U všech dalších směsí, kde figuruje plnivo duté skleněné kuličky, dochází k dalšímu nárůstu hodnoty modulu pružnosti, a to přibližně geometrickou řadou vzhledem k rostoucímu procentuálnímu zastoupení dutých skleněných kuliček, což je patrné v grafu 3.2.3.3. Tímto bylo prakticky ověřeno tvrzení, že s obsahem dutých skleněných kuliček modul pružnosti

vzrůstá, ze zdroje [21] z kapitol 2.4.2 a 2.5. U směsí polypropylenu s talkem a dutých kuliček se nedostaneme na hodnoty polypropylenu plněného pouze dutými skleněnými kuličkami. Nejvyšší nárůst modulu pružnosti pak vůči čistému polypropylenu vykazuje materiál PP + 20 % kuliček typu iM30K, kde dochází ke zvýšení hodnoty  $E_m$  průměrně o 44 %.

## 4.4. Stanovení ohybových vlastností

U ohybové zkoušky jsme vyhodnocovali napětí na mezi pevnosti  $\sigma_f$ , deformaci v ohybu  $\varepsilon_f$  a modul pružnosti  $E_f$ . Tyto naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 3.2.4.1 až 3.2.4.15 v kapitole 3.2.4.

### 4.4.1 Napětí na mezi pevnosti

Plněné materiály vykazovaly už ale zcela jiné chování na mezi pevnosti v ohybu. Nejvyšších hodnot dosáhl opět neplněný polypropylen, ovšem s příměsí talku došlo k poklesu mezi pevnosti v tahu v průměru o 15 %. Nejlepší kompozit s dutými skleněnými kuličkami z hlediska mezi pevnosti v ohybu pak představuje materiál PP + 10 % iM16K, kde činil pokles hodnoty pevnosti v ohybu pouze 3,4 %. Podobnost s výsledky zkoušky tahem je ve stejně odlišném chování při rostoucím obsahu kuliček u materiálů, kde je jako plnivo pouze kuličky a kde je plnivo kuličky a talek, viz. graf 3.2.4.1 z kapitoly 3.2.4.

### 4.4.2 Deformace v ohybu

Na základě experimentálního měření deformace v ohybu byl z hodnot sestaven graf 3.2.4.2, na kterém je vidět podobnost závislosti deformace na obsahu dutých skleněných kuliček jako u grafu srovnání poměrného prodloužení 3.2.3.2. Platí zde tedy také nepřímá úměra. Největší deformace v ohybu dosahoval neplněný polypropylen. Naopak nejmenší deformace vykazoval materiál PP + 20 % iM16K, kde oproti neplněnému polypropylenu byla deformace v průměru o 48 % nižší.

### 4.4.3 Modul pružnosti

Pokud porovnáme graf s hodnotami modulu pružnosti v tahu 3.2.3.3 z kapitoly 3.2.4 a graf modulu pružnosti v ohybu 3.2.4.3 z kapitoly 3.2.4, je zde patrná podobnost: modul pružnosti má s rostoucím obsahem kuliček opět vzrůstající tendenci a nejvyšších hodnot je dosaženo u rovněž materiálu PP + 20 % iM30K, kde se modul pružnosti oproti neplněnému polypropylenů zvýšil cca o 53 %.

### 4.5. Stanovení houževnatosti

Z důvodu předpokládaných velmi odlišných houževnatostí u neplněných a plněných materiálů byla vyhodnocována jak rázová, tak i vrubová houževnatost. U rázové houževnatosti, která je uvedena v grafu 3.2.5.1 v kapitole 3.2.5, vychází jako materiál s největší houževnatostí polypropylen, který dosahuje stejných hodnot houževnatosti jako polypropylen plněný talkem. Zde ale v grafu porovnání hodnot rázové houževnatosti dochází ke zkreslení výsledků, protože u obou materiálů ve většině případů měření nedošlo k přeražení zkušebního tělesa. Tento výsledek tedy zpřesňuje graf porovnání vrubové houževnatosti 3.2.5.2, kde materiál PP + 15 % talku dosahuje nejvyšších hodnot houževnatosti s většinou vzorků porušených kloubovým přeražením. Z kompozitů plněných dutými skleněnými kuličkami vykazuje nejvyšší houževnatost materiál PP + 15 % talku + 10% iM16K, s průměrnou hodnotou rázové houževnatosti 112 kJ/m<sup>2</sup> a vrubové houževnatosti 9,02 kJ/m<sup>2</sup>, kde navíc došlo pouze ke kloubovému přeražení. Z obou grafů vyplývá, že přísada talku zvyšuje houževnatost materiálu a s rostoucím obsahem dutých skleněných kuliček houževnatost naopak klesá, a tím jsou ověřena tvrzení z kapitol 2.3.2 a 2.5.



## 4.6 DSC analýza

DSC analýza dokládá příčinu zlepšení některých mechanických vlastností v materiálech s dutými skleněnými kuličkami, které byly naměřeny v kapitolách 3.2.3 a 3.2.4. V případě polypropylenu plněného kuličkami je z křivek termogramů v grafu 3.2.6.1 v kapitole 3.2.6 zřejmé, že ke krystalizaci dochází dříve než u neplněného polypropylenu – kuličky zde působí jako nukleační činidlo. Naproti tomu je urychlení krystalizace polypropylenu s talkem plněného kuličkami méně výrazné než v prvním případě, a to nejspíše z důvodu, že sférolity zde nerostou do takové velikosti, protože jejich růstu zabraňuje právě talek. To například odůvodňuje, proč jsou některé hodnoty mechanických vlastností polypropylenu s talkem a kuličkami nižší než u polypropylenu pouze s talkem.





## 5. Závěr

V diplomové práci byla nejprve provedena rešerše aktuálního stavu využívání aplikací s dutými skleněnými kuličkami. Některé deklarované výhody použití dutých skleněných kuliček z firemních literatur byly ověřeny v praktické části zkouškami fyzikálních i mechanických vlastností spolu s dalšími zkouškami užitných vlastností. Celkem takto bylo porovnáváno 14 druhů materiálů, které se od sebe lišily typem matrice, typem dutých skleněných kuliček nebo jejich procentuálním objemem v kompozitu.

Abychom mohli vybrat jednu směs materiálu s dutými skleněnými kuličkami, která bude doporučena pro výrobu, je potřeba ještě kromě fyzikálních a mechanických vlastností vyhodnotit hledisko ekonomické stránky. Z tohoto důvodu byla provedena následující kalkulace ceny na výrobek pro každý druh materiálu.

Jelikož si firma Magna Exteriors & Interiors (Bohemia) s.r.o. nepřeje zveřejnit nákupní ceny materiálů, budeme vyjadřovat ceny jednotlivých materiálů, ze kterých se bude skládat kompozit, jako podíl „x“ vůči ceně čistého polypropylenu:

- cena 1 kg PP = x,
- cena 1 kg PP + 15 % talek = 1,08x,
- cena 1 kg kuliček iM16K = 4,11x,
- cena 1 kg kuliček iM30K = 4,89x.

Protože hustota dutých skleněných kuliček je výrazně nižší než hustota matrice, což je hlavní předností aplikací s dutými skleněnými kuličkami, musíme ve výpočtech uvažovat s cenami za  $1\text{ m}^3$ , nikoliv s cenami za 1 kg. Pro přepočet nám poslouží rovnice (5.1).

$$\text{Cena za } 1\text{ m}^3 = \rho \cdot \text{cena za } 1\text{ kg} \quad (5.1)$$



kde je:

Cena za 1 m<sup>3</sup> ... cena 1 m<sup>3</sup> materiálu vyjádřená vůči ceně čistého PP [-],

cena za 1 kg ... cena 1 kg materiálu vyjádřená vůči ceně čistého PP [-],

$\rho$  ... hustota materiálu [kg/m<sup>3</sup>].

Ve výpočtu jsme uvažovali s hustotami:

- PP ...  $\rho=885,42$  kg/m<sup>3</sup> - změřeno imerzní metodou,
- PP + 15 % talek ...  $\rho=991,53$  kg/m<sup>3</sup> – změřeno imerzní metodou,
- duté skleněné kuličky iM16K ...  $\rho=460$  kg/m<sup>3</sup> – z materiálového listu [29],
- duté skleněné kuličky iM30K ...  $\rho=600$  kg/m<sup>3</sup> – z materiálového listu [30].

Tab. 5.1: Přepočítané ceny materiálů za 1 m<sup>3</sup>

Materiál	Cena za 1 m <sup>3</sup>	Cena za 1m <sup>3</sup> vůči ceně 1 m <sup>3</sup> PP [%]
PP	885,4x	100
PP + 15 % talek	1070,9x	120,95
Kuličky iM16K	1890,6x	213,53
Kuličky iM30K	2934,0x	331,38

Hmotnostní zastoupení plniva nejprve přepočteme na objemové zastoupení podle vzorce 5.2.

$$vol\% GB = \frac{\frac{wt\% GB}{\rho_{GB}}}{\frac{wt\% GB}{\rho_{GB}} + \frac{wt\% matrice}{\rho_{matrice}}} \cdot 100 \quad (5.2)$$

kde je:

vol% GB ... zastoupení dutých skleněných kuliček v objemu [%],



wt% GB ... zastoupení dutých skleněných kuliček v hmotnosti [%],

$\rho_{GB}$  ... hustota dutých skleněných kuliček [kg/m<sup>3</sup>],

$\rho_{matrice}$  ... hustota matrice [kg/m<sup>3</sup>].

Tab. 5.2: Tabulka přepočtených hodnot na objemová procenta kuliček.

Plnivo	wt% GB [%]	vol% GB [%]
PP + 10 % iM16K	10	17,6
PP + 15 % iM16K	15	25,4
PP + 20 % iM16K	20	32,5
PP +15% talek + 10 % iM16K	10	19,3
PP +15% talek + 15 % iM16K	15	27,6
PP +15% talek + 20 % iM16K	20	35,0
PP + 10 % iM30K	10	14,1
PP + 15 % iM30K	15	20,7
PP + 20 % iM30K	20	26,9
PP +15% talek + 10 % iM30K	10	15,6
PP +15% talek + 15 % iM30K	15	22,6
PP +15% talek + 20 % iM30K	20	29,2

Ceny výsledného kompozitu spočítáme ze vztahu 5.3.

$$\text{Podíl z ceny 1 kg PP} = \frac{\text{vol\%}_{matrice} \cdot C_{matrice} + \text{vol\% GB} \cdot C_{plniva}}{100} \quad (5.3)$$

kde je:

VOL%<sub>matrice</sub> ... poměr zastoupení matrice v objemu kompozitu [%],

VOL% GB ... poměr zastoupení plniva v objemu kompozitu [%],

$C_{matrice}$  ... cena matrice za 1 m<sup>3</sup> v poměru k ceně 1 m<sup>3</sup> čistého PP [%],

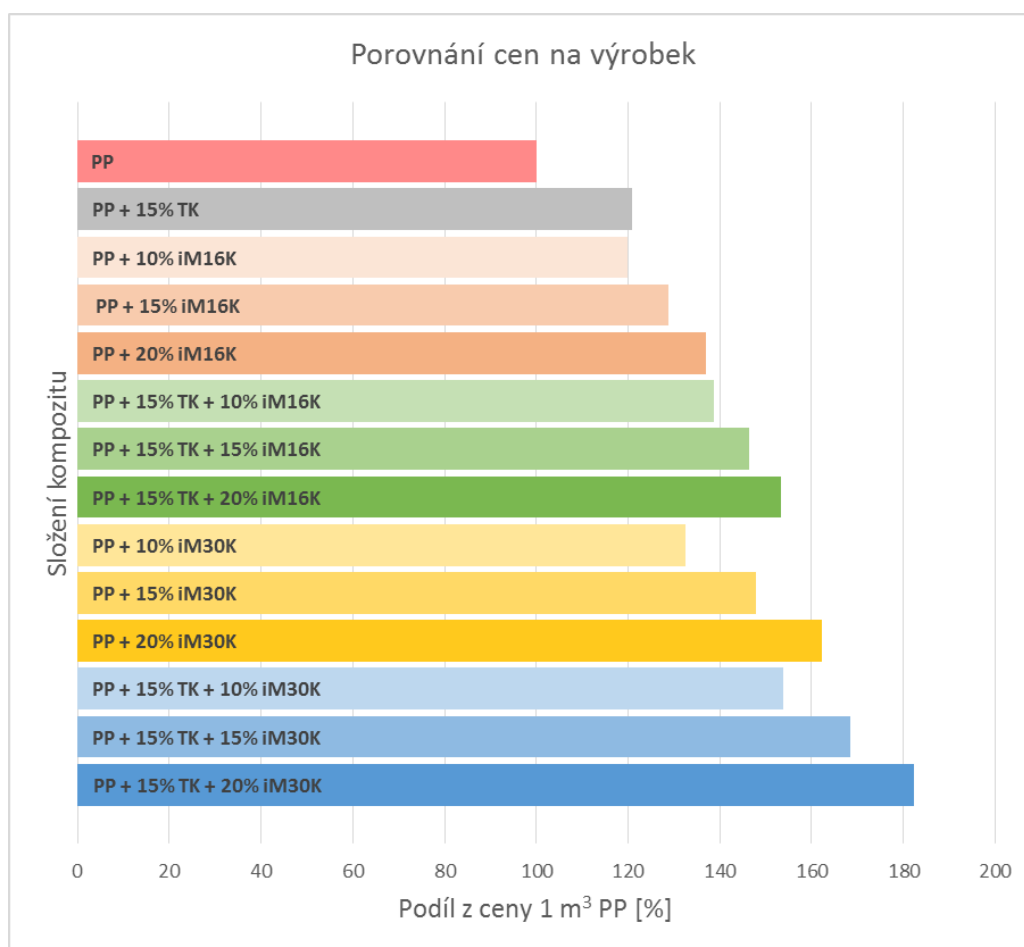
$C_{plniva}$  ... cena plniva za 1 m<sup>3</sup> v poměru k ceně 1 m<sup>3</sup> čistého PP [%].



Vypočtené konečné ceny vztažené k ceně polypropylenu jsou uvedeny v tabulce 5.3.

Tab. 5.3: Výsledná kalkulace ceny materiálu.

Druh kompozitu	Cena za 1m <sup>3</sup> vůči ceně 1 m <sup>3</sup> PP [%]
PP	100
PP + 15 % talek	120,95
PP + 10 % iM16K	119,98
PP + 15 % iM16K	128,84
PP + 20 % iM16K	136,89
PP + 15 % talek + 10 % iM16K	138,82
PP + 15 % talek + 15 % iM16K	146,50
PP + 15 % talek + 20 % iM16K	153,35
PP + 10 % iM30K	132,62
PP + 15 % iM30K	147,89
PP + 20 % iM30K	162,24
PP + 15 % talek + 10 % iM30K	153,78
PP + 15 % talek + 15 % iM30K	168,51
PP + 15 % talek + 20 % iM30K	182,40



Graf 5.1: Grafické porovnání cen jednotlivých druhů kompozitů.

Toto srovnání cen můžeme považovat za konečné, protože další aspekty pro cenovou kalkulaci výrobku jako je objem vtoku, náklady na formu, náklady na stroj a jiné, zde nejsou závislé na druhu kompozitu. Z grafického porovnání v grafu 5.1 vychází, že ze směsí s dutými skleněnými kuličkami nejlevněji vychází materiál PP + 10 % iM16K, jehož cena předčí i polypropylen plněný talkem (cenová úspora zde činí zhruba 1 %). V dalších případech už se ceny dalších materiálů pohybují nad cenou polypropylenů s talkem a platí zde přímá úměra mezi cenou a obsahem kuliček v kompozitu.



Dalším hlediskem pro doporučení jedné ze směsí s dutými skleněnými kuličkami je posouzení zpracovatelských vlastností. Parametry vstřikování u směsí s kuličkami byly voleny stejné jako u neplněných materiálů, u granulace nebyl žádný problém s extruzí samotné struny materiálu a ani při vstřikování nebyl problém s tekutostí, což nejspíše příznivě ovlivnil samotný tvar kuliček, který tak měl minimální vliv na tok taveniny (např. oproti vláknům). Z těchto důvodů se dá prohlásit, že zpracovatelské vlastnosti směsí s dutými skleněnými kuličkami jsou dobré a nejsou nijak znevýhodněny oproti neplněným materiálům.

Vyhodnocením těchto zkoumaných 14 druhů materiálu z hlediska užitných a zpracovatelských vlastností a spolu s cenovou kalkulací docházíme k závěru, že doporučenou směsí pro výrobu je materiál **polypropylen + 10 % kuliček typu iM16K**, protože je u této směsi:

1) oproti neplněnému polypropylenů

- nižší hustota,
- nižší poměrné prodloužení v tahu,
- nižší deformace v ohybu,
- vyšší modul pružnosti v tahu,
- vyšší modul pružnosti v ohybu,
- srovnatelná pevnost v ohybu.

2) oproti polypropylenů plněnému 15 % talku

- nižší hustota,
- nižší poměrné prodloužení v tahu,
- nižší deformace v ohybu,
- vyšší modul pružnosti v tahu,
- vyšší modul pružnosti v ohybu,
- vyšší pevnost v tahu,
- vyšší pevnost v ohybu,
- nižší cena.



## 6. Seznam použité literatury

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 278 s. ISBN 80-708-0617-6.
- [2] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [3] KREBS, Josef. *Teorie zpracování nekovových materiálů*. Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita, 2001, 250 s. ISBN 80-708-3449-8.
- [4] LENFELD, Petr. *Technologie II: úvod do vstřikování termoplastů*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005, 138 s. ISBN 80-737-2037-X.
- [5] FOŘT, Petr a Michal PROKEŠ. K plastovému dílu cesta dlouhá. *Designtech* [online]. 2006 [cit. 2013-03-19]. Dostupné z: <http://www.designtech.cz/c/plm/k-plastovemu-dilu-cesta-dlouha.htm>
- [6] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 1995, 354 s. ISBN 80-708-0241-3.
- [7] MAIER, Clive a Teresa CALAFUT. *Polypropylene: the definitive user's guide and databook*. Norwich, NY: Plastics Design Library, c1998, xx, 432 p. ISBN 18-842-0758-8.
- [8] BĚHÁLEK, Luboš. *Přehled základních termoplastů, reaktoplastů a termoplastických elastomerů*. Liberec, 2006.
- [9] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2009, 246 s. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [10] MURPHY, John. *Additives for plastics handbooks*. 2nd ed. New York, NY, USA: Elsevier Science Ltd., c2001, xxii, 469 p. ISBN 18-561-7370-4.
- [11] JEDLA, Pavel. *Přísady a příměsi pro výrobu vysokohodnotných betonů*. Zlín, 2010. Dostupné z: [http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/14731/jedla\\_2010\\_b](http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/14731/jedla_2010_b)



- p.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [12] PRITCHARD, G. *Plastics additives: an A-Z reference*. 1st ed. New York: Chapman, 1998, xx, 633 p. Polymer science and technology series (London, England). ISBN 04-127-2720-X.
- [13] CRAWFORD, R.J. *Plastics engineering*. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997. ISBN 978-075-0637-640.
- [14] *Osthoff Omega Group* [online]. 2013 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: [http://osthoffomegagroup.com/cms/front\\_content.php?idcat=37&lang=1](http://osthoffomegagroup.com/cms/front_content.php?idcat=37&lang=1)
- [15] HOCHMANNOVÁ, Libuše. *Sborník přednášek: Povrchové úpravy*. Jihlava, 2005.
- [16] Vlastní fotografie.
- [17] YALCIN, Baris. Polymer Composites with Hollow Glass Microspheres: Processing, Properties and Applications. [online]. [cit. 2013-03-02]. Dostupné z: <http://li1.workcast.net/10416/6837218870151564/Documents/Baris'%20presentation%20slides.pdf>
- [18] 3M. Skleněné mikrokuličky: Obecné technické informace a specifikace. [online]. [cit. 2013-03-02]. Dostupné z: [http://solutions.3mcesko.cz/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?ImageId=1211987806000&locale=cs\\_CZ&assetType=MMM\\_Image&assetId=1180599594370&blobAttribute=ImageFile](http://solutions.3mcesko.cz/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?ImageId=1211987806000&locale=cs_CZ&assetType=MMM_Image&assetId=1180599594370&blobAttribute=ImageFile)
- [19] 3M Glass Bubbles: For Resin Systems. [online]. 2010 [cit. 2013-03-04]. Dostupné z: [http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=SSSSSufSevTsZxtUO8tvm8\\_ZevUgevTSevTSevTSeSSSSSS--&fn=GlassBubbResinSysDMR.pdf](http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=SSSSSufSevTsZxtUO8tvm8_ZevUgevTSevTSevTSeSSSSSS--&fn=GlassBubbResinSysDMR.pdf)
- [20] 3M. Tisková zpráva: Příspěvy od 3M odlehčují auta nebo vylepšují plasty. [online]. [cit. 2013-03-02]. Dostupné z: [http://solutions.3mcesko.cz/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?ImageId=1282660835000&locale=cs\\_CZ&assetType=MMM\\_Image&assetId=1273665348635&blobAttribute=ImageFile](http://solutions.3mcesko.cz/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?ImageId=1282660835000&locale=cs_CZ&assetType=MMM_Image&assetId=1273665348635&blobAttribute=ImageFile)





- [21] AMOS, Steve. 3M. *Glass Bubble Properties and Applications*. St. Paul, MN, United States, 2011.
- [22] 3M Skleněné mikrokuličky pro automobilový průmysl. [online]. 2007 [cit. 2013-03-02]. Dostupné z:  
[http://solutions.3mcesko.cz/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?ImageId=1195486047000&locale=cs\\_CZ&assetType=MMM\\_Image&assetId=1180593477592&blobAttribute=ImageFile](http://solutions.3mcesko.cz/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?ImageId=1195486047000&locale=cs_CZ&assetType=MMM_Image&assetId=1180593477592&blobAttribute=ImageFile)
- [23] *Matrice vláknových kompozitů* [online]. 2011 [cit. 2013-03-02]. Dostupné z:  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Matrice\\_vl%C3%A1knov%C3%BDch\\_kompozit%C5%AF](http://cs.wikipedia.org/wiki/Matrice_vl%C3%A1knov%C3%BDch_kompozit%C5%AF)
- [24] 3M. *Glass Bubble Applied Interior Parts*. St. Paul, MN, United States, 2012.
- [25] 3M. Flying High with 3M Glass Bubbles. [online]. 2012 [cit. 2013-03-02]. Dostupné z:  
[http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=66666UF6EVsSyXTtO8T2m8TaEVtQEVs6EVs6EVs6E66666--&fn=RehauCaseStudy.pdf&cshift\\_ck=null&client\\_id=752rfn6820](http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=66666UF6EVsSyXTtO8T2m8TaEVtQEVs6EVs6EVs6E66666--&fn=RehauCaseStudy.pdf&cshift_ck=null&client_id=752rfn6820)
- [26] 3M. 3M Speciální materiály: Skleněné mikrokuličky pro stavební průmysl. [online]. 2008 [cit. 2013-03-02]. Dostupné z:  
[http://solutions.3mcesko.cz/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?ImageId=1211987677000&locale=cs\\_CZ&assetType=MMM\\_Image&assetId=1180599593801&blobAttribute=ImageFile](http://solutions.3mcesko.cz/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?ImageId=1211987677000&locale=cs_CZ&assetType=MMM_Image&assetId=1180599593801&blobAttribute=ImageFile)
- [27] BĚHÁLEK, Luboš. Granulace za studena. In: *Teorie zpracování nekovových materiálů* [online]. 2005 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z:  
[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materi%C3%A1ly/tzn/c8/granulace.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materi%C3%A1ly/tzn/c8/granulace.pdf)
- [28] *GDK - extrusion blow moulding machines* [online]. 2013 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.gdk.cz/en/lablines/>
- [29] 3M™ Glass Bubbles iM16K: Product information. 3M [online]. 2013 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z:  
<http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=66666Ugx>



[GCUyXTtO8TEm8TcEVtQEcuZgVs6EVs6E666666--  
&fn=GlassBubbles\\_iM16K\\_Celum\\_9842213](http://www.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=SSSSSu7zK1fslxtUNY_Un8_Uev7qe17zHvTSevTSeSSSSSS--&fn=GlassBubbles_iM16K_Celum_9842213)

- [30] 3M™ iM30K Hi-Strength Glass Bubbles: Paints and Coatings Technical Information. 3M[online]. 2013 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z:  
[http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=SSSSSu7zK1fslxtUNY\\_Un8\\_Uev7qe17zHvTSevTSeSSSSSS--](http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=SSSSSu7zK1fslxtUNY_Un8_Uev7qe17zHvTSevTSeSSSSSS--)
- [31] SPC. *Technical data sheet: Thermofil PP E020M*. United Kingdom, 2008.
- [32] SPC. *Technical data sheet: D320G02*. United Kingdom, 2008.
- [33] ČSN EN ISO 294. *Vstřikování zkušebních těles z termoplastů*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [34] ČSN EN ISO 527. *Plasty - Stanovení tahových vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [35] *Laboratoř zkoušení plastů* [online]. 2005 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z:  
<http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/plasty/plasty.htm>
- [36] ČSN EN ISO 178. *Plasty - Stanovení ohybových vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [37] BĚHÁLEK, Luboš. *VLASTNOSTI A INŽENÝRSKÉ APLIKACE PLASTŮ: Fyzikální a mechanické vlastnosti plastů* [online]. 2013 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: [http://www.techno-mat.cz/data/katedry/ksp/KSP\\_VIP\\_PR\\_06\\_CZE\\_Behalek\\_Fyzikalni\\_a\\_mechanicke\\_vlastnosti\\_plastu.pdf](http://www.techno-mat.cz/data/katedry/ksp/KSP_VIP_PR_06_CZE_Behalek_Fyzikalni_a_mechanicke_vlastnosti_plastu.pdf)
- [38] ČSN EN ISO 179-1. *Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [39] ČSN EN ISO 2818. *Plasty - Příprava zkušebních těles obráběním*. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [40] *Diferenciální skenovací kalorimetrie "DSC"* [online]. 2005 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z:  
[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/vip/p4/DS\\_C2.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/p4/DS_C2.pdf)

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnou-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 24. 5. 2013

Podpis:

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I use inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expense invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Datum: 24. 5. 2013

Signature: